

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**DESEMPENHO DE PAVIMENTO SUSTENTÁVEL COM CAMADA DE BASE DE
MISTURA RECICLADA ESTABILIZADA COM ESPUMA DE ASFALTO**

LARA CORDEIRO PITANGUI

ORIENTADOR: PROF. RAFAEL CERQUEIRA SILVA, *D.Sc.*

COORIENTADOR: PROF. LUIZ GUILHERME RODRIGUES DE MELLO, *D.Sc.*

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-379/2022
BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO/2022

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**DESEMPENHO DE PAVIMENTO SUSTENTÁVEL COM CAMADA DE BASE DE
MISTURA RECICLADA ESTABILIZADA COM ESPUMA DE ASFALTO**

LARA CORDEIRO PITANGUI

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.**

APROVADA POR:

Prof. Rafael Cerqueira Silva, *D.Sc.* (UnB)
(ORIENTADOR)

Prof. Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, *D.Sc.* (UnB)
(COORIENTADOR)

Prof. Márcio Muniz de Farias, *PhD* (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Prof.^a Laura Maria Goretti da Motta, *D.Sc.* (COPPE/UFRJ)
(EXAMINADORA EXTERNA)

FICHA CATALOGRÁFICA

PITANGUI, LARA CORDEIRO

Desempenho de pavimento sustentável com camada de base de mistura reciclada estabilizada com espuma de asfalto. [Distrito Federal] 2022.

xii, 120 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2022).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Palavras chaves:

- | | |
|--------------------------|----------------------------|
| 1. Espuma de asfalto | 2. Pavimentos sustentáveis |
| 3. Trechos experimentais | 4. Base estabilizada |
| I. ENC/FT/UnB | II. Mestre |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PITANGUI, L.C. (2022). Desempenho de pavimento sustentável com camada de base de mistura reciclada estabilizada com espuma de asfalto. Dissertação de mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 120p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lara Cordeiro Pitangui.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Desempenho de pavimento sustentável com camada de base de mistura reciclada estabilizada com espuma de asfalto.

GRAU/ANO: Mestre/2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Lara Cordeiro Pitangui

Universidade de Brasília, Secretaria da Coordenação de Pós-Graduação em Geotecnia Campus Darcy Ribeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Prédio SG-12, Universidade de Brasília. CEP 70910-900 - Brasília, DF – Brasil

laracordeiop@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me conceder a graça de chegar até aqui.

À minha família, em especial à minha mãe, que sempre esteve ao meu lado e nunca mediu esforços para que eu pudesse estudar.

Aos amigos do mestrado, em especial ao Matheus e à Isabella, que sempre estiveram dispostos a me ajudar. Sou muito grata a vocês.

Ao meu orientador, Rafael, pelos ensinamentos repassados ao longo deste trabalho, e por me aceitar como sua aluna, acreditando no meu potencial. Obrigada pelo apoio de sempre, professor.

Ao meu coorientador, Luiz Guilherme, pelos valiosos conselhos e lições repassados desde a graduação.

À Concessionária Auto Raposo Tavares – CART, por fornecer os subsídios para a construção e o acompanhamento dos trechos experimentais, bem como para os ensaios laboratoriais, em especial ao Gerson, Alexandre, Lucas, Isadora e Juliana.

À construtora KAPA engenharia, pelo apoio prestado durante a construção e o acompanhamento dos trechos experimentais.

À equipe do INFRALAB, da Universidade de Brasília, em especial ao Everton e à Letícia, pelo auxílio prestado para a realização de parte dos ensaios laboratoriais.

Ao Vinícius, da Traficon Engenharia, pelo apoio e paciência na realização dos ensaios da mistura reciclada estudada nesta pesquisa.

À Universidade de Brasília, pelo ensino de qualidade.

Ao IPR/DNIT, pelo apoio de sempre.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Apoio à Pesquisa (FAP/DF) pelo apoio financeiro concedido para realização dessa pesquisa.

Obrigada!

DESEMPENHO DE PAVIMENTO SUSTENTÁVEL COM CAMADA DE BASE DE MISTURA RECICLADA ESTABILIZADA COM ESPUMA DE ASFALTO

RESUMO

Buscando fomentar o uso de materiais sustentáveis em pavimentação, foi implantado um Trecho Experimental (TE) com três subtrechos na rodovia SP-270, utilizando uma mistura estabilizada com espuma de asfalto na camada de base, contando com a incorporação de material fresado. As espessuras das camadas de base nos subtrechos 2 e 3 foram reduzidas em relação ao projeto original, correspondente ao subtrecho 1. Para avaliar o desempenho dos pavimentos frente às ações do tráfego e climáticas, foram monitorados o afundamento de trilha de rodas (ATR), a área trincada e as bacias de deflexão. A deflectometria foi realizada com a Viga Benkelman (VB) e, além disso, em uma das campanhas de levantamento de campo, também foi empregado o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) em conjunto com a VB, obtendo uma correlação entre ambos os equipamentos nos subtrechos estudados. Para avaliação dos materiais, foram realizados ensaios laboratoriais solicitados no Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), em especial o triaxial de cargas repetidas para obtenção do Módulo de Resiliência (MR) e da Deformação Permanente (DP). Devido às particularidades, o material da base também foi ensaiado em diferentes períodos de cura. Para o concreto asfáltico (CA) determinou-se apenas o MR, faltando ensaios de fadiga e *Flow Number* (FN) - em andamento. O monitoramento do pavimento *in situ*, com duração de seis meses, mostrou um bom comportamento, não apresentando trincamento nas camadas de revestimento. Entretanto, em função da consolidação da mistura estabilizada, verificou-se evolução do ATR. Na análise das deflexões, para o subtrecho 1, houve redução da deflexão máxima (D_0) e as retroanálises indicaram um aumento do MR. Nos subtrechos 2 e 3, mesmo observando aumento de D_0 , os MR retroanalizados da base cresceram em razão da consolidação da camada. Quanto à avaliação laboratorial, a dependência da tensão confinante no modelo do MR mostra que a mistura estabilizada possui um comportamento de material granular. No que se refere à cura do material, observa-se dependência da temperatura e da quantidade de dias, sendo ainda precoce definir qual o método que representa da melhor maneira o comportamento do material em campo. Houve inconsistência entre a previsão do trincamento e o verificado *in situ*, quando da avaliação com o MeDiNa, porém este resultado era esperado, tendo em vista que a previsão do MeDiNa é decorrente de Função de Transferência (FT) calibrada para TE com estruturas distintas dos pavimentos em estudo. Assim, com o complemento dos ensaios (fadiga e FN para o CA), a continuidade do monitoramento do TE e a implantação de novos trechos, será possível construir um banco de dados para proposição de uma FT para pavimentos que incorporem essa solução.

Palavras-Chave: Espuma de asfalto; Trecho Experimental; Mistura estabilizada; Pavimento sustentável.

SUSTAINABLE PAVEMENT PERFORMANCE WITH STABILIZED RECYCLED MIX BASE LAYER WITH ASPHALT FOAM

ABSTRACT

Seeking to encourage the use of sustainable materials in paving area, a Test Section (TS) was implemented with three test subsections on the SP-270 highway, using a stabilized mix with foamed bitumen in the base course, with the incorporation of milled material. The base layers thickness in subsections 2 and 3 were reduced in relation to the original project, corresponding to subsection 1. To evaluate the performance of the pavements in face of traffic and weather, the Wheel Path Rutting (WPR) was monitored, cracking evaluation and deflection control. Deflectometry was performed with the Benkelman Beam (BB) and, in addition, in one of the field survey campaigns, the Falling Weight Deflectometer (FWD) was also used in conjunction with the BB, obtaining a correlation between both equipment in the subsections studied. To evaluate the materials, laboratory tests requested in the National Dimensioning Method (MeDiNa) were carried out, especially on the triaxial repeated load testing aiming to obtain the Resilient Modulus (RM) and Permanent Deformation (PD). Due to the particularities, the base material was also tested in different curing periods. For Asphalt Concrete (AC) only the RM was determined, still missing fatigue tests and Flow Number (FN) - in progress. The pavement monitoring in situ, in a period of six months, showed a good behavior, with no cracking in the asphalt coating layers. However, due to the consolidation of the stabilized mixture, there was an increase of the WPR with time. In the deflections analysis, for subsection 1, there was a reduction in the maximum deflection (D_o) and the back analyses indicated an increase in the RM. In subsections 2 and 3, even observing an increase in D_o , the MR analyzed back from the base increased due to the consolidation of the layer. Regarding the laboratory evaluation, the dependence of the confining stress in the MR model shows that the stabilized mixture has a granular material behavior. As for the curing of the material, there is a dependence on temperature and the number of days, being still early to define which method best represents the material's behavior in the field. There was an inconsistency between the prediction of cracking and the one verified in situ, when evaluating with MeDiNa, but this result was expected, considering that the prediction of MeDiNa is due to a Transfer Function (TF) calibrated for TS with structures different from these under study. Thus, with the complement of tests (fatigue and FN for the AC), the continuity of monitoring the TS and the implementation of new test sections, it will be possible to build a database to propose a FT for pavements that incorporate this type of solution.

Keywords: Asphalt foam; Test sections; Stabilized mixtures; Sustainable pavements.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVO	3
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2	RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	5
2.1.	MISTURAS RECICLADAS A FRIO ESTABILIZADAS COM LIGANTE ASFÁLTICO	6
2.2.	ESPUMA DE ASFALTO	9
2.3.	MISTURA ESTABILIZADA COM ESPUMA DE ASFALTO	11
2.4.	AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS POR TRECHOS EXPERIMENTAIS (TE)	15
2.4.1.	AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS	18
2.4.2.	AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS POR ENSAIOS LABORATORIAIS	22
2.4.3.	PROCEDIMENTOS DE CURA DA BSM	25
2.4.4.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	26
2.4.4.1.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM SOLOS E MATERIAIS GRANULARES	27
2.4.4.2.	DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM SOLOS E MATERIAIS GRANULARES	28
2.4.4.3.	MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	30
2.4.4.4.	FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS	32
2.4.4.5.	FLOW NUMBER	33
3	METODOLOGIA	35
3.1.	DEFINIÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL	35
3.2.	CONSTRUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL	40
3.3.	SONDAGENS E COLETA DE MATERIAIS	42
3.4.	GEOGAUGE	43
3.5.	MONITORAMENTO	44
3.5.1.	LEVANTAMENTOS DE CAMPO	44
3.5.2.	CORREÇÃO DAS LEITURAS DEFLETOMÉTRICAS	46
3.6.	ENSAIOS LABORATORIAIS	49
3.6.1.	ENSAIOS DOS MATERIAIS DAS CAMADAS	49
3.6.2.	EFEITO DA CURA NA MISTURA ESTABILIZADA COM ESPUMA ASFALTO	54
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	55

4.1.1.	CAMADA DE SUBLEITO	56
4.1.2.	CAMADA DE BASE.....	64
4.1.3.	CAMADA DE REVESTIMENTO	73
4.2.	MONITORAMENTO.....	74
4.2.1.	AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODAS	74
4.2.2.	DEFLEXÕES COM A VIGA BENKELMAN	76
4.2.3.	ANÁLISE DAS PRECIPITAÇÕES	79
4.2.4.	DEFLEXÕES COM O FWD	81
4.2.5.	CORRELAÇÃO ENTRE FWD E VIGA BENKELMAN	83
4.3.	RETROANÁLISE	85
4.4.	ANÁLISE COM O MEDINA.....	91
5	CONCLUSÕES	97
5.1.	SUGESTÃO DE FUTURAS PESQUISAS	102
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 – Materiais empregados em pavimentação: relação de rigidez e flexibilidade. Adaptado de Bonfim (2021).....	8
Figura 2-2 – Produção da Espuma de Asfalto (Wirtgen, 2019).....	9
Figura 2-3 – Taxa de Expansão (TE) e Meia-Vida (MV) (Wirtgen, 2012).	10
Figura 2-4 – Material ligado de forma não contínua (Wirtgen, 2019).....	12
Figura 2-5 – Usina Móvel KMA 220.	14
Figura 2-6 – Dados necessários para retroanálise (Nóbrega, 2003 <i>apud</i> Bernucci <i>et al.</i> , 2010).	20
Figura 2-7 – Análise do acomodamento (<i>shakedown</i>) (Lima, 2021).....	29
Figura 2-8 – Gráfico do ensaio de Módulo de Resiliência (DNIT 135/2018 – ME).	31
Figura 2-9 – Curva típica do ensaio de <i>Flow Number</i> (DNIT 184/2018-ME).....	34
Figura 3-1 – Solução de projeto original realizada pela COPAVEL.	36
Figura 3-2 – Trecho experimental antes da restauração.....	36
Figura 3-3 – Sondagem Trecho Experimental – julho/2021 (CART).....	37
Figura 3-4 – Soluções dos Trechos Experimentais.	38
Figura 3-5 – Curva granulométrica da mistura reciclada com espuma de asfalto.	39
Figura 3-6 – Material Espumado.....	41
Figura 3-7 – Execução dos Subtrechos T1, T2 e T3.	42
Figura 3-8 – Leitura com Geogauge.	43
Figura 3-9 – Correção das deflexões em função da temperatura. DER/SP (2006).	47
Figura 4-1 – Determinação do teor de umidade ótimo do material do subleito.....	57
Figura 4-2 – Módulo de resiliência em função da tensão confinante (σ_3).	59
Figura 4-3 – Módulo de resiliência em função da tensão desvio (σ_d).....	59
Figura 4-4 – Deformação permanente acumulada para o material do subleito.....	61
Figura 4-5 – Análise do <i>Shakedown</i> para o material do subleito.	63
Figura 4-6 – Equipamento triaxial para ensaios de MR e DP.....	65

Figura 4-7 – Módulo de resiliência com diferentes curas em função da tensão confinante (σ_3).	65
Figura 4-8 – Módulo de resiliência (MR) com diferentes processos de cura em função da tensão desvio (σ_d).	66
Figura 4-9 – Deformação permanente acumulada para o material da base.	70
Figura 4-10 – Análise do <i>shakedown</i> para o material da base.	72
Figura 4-11 – Etapas do ensaio de Módulo de Resiliência.	73
Figura 4-12 – Evolução do Afundamento de Trilha de Rodas.....	75
Figura 4-13 – Evolução das deflexões máximas no Trecho 1.....	77
Figura 4-14 – Evolução das deflexões máximas no Trecho 2.....	77
Figura 4-15 – Evolução das deflexões máximas no Trecho 3.....	78
Figura 4-16 – Dados meteorológicos trecho experimental.	80
Figura 4-17 – Bacia deflectométrica FWD do dia 22/02/2022 sem correções.	81
Figura 4-18 – Bacias deflectométricas do FWD corrigidas.	83
Figura 4-19 – Bacias deflectométricas transformadas de Viga para o FWD do dia 30/05/2022.	85
Figura 4-20 – Corpo de prova extraído do campo com indicação da interface entre o revestimento asfáltico e a base.	87
Figura 4-21 – Estrutura adotada no MeDiNa.	92
Figura 4-22 – Evolução da área trincada e do ATR no T1.	92
Figura 4-23 – Análise do ATR por camada do T1.....	93
Figura 4-24 – Comparação de dados de campo e previsão do MeDiNa para o T1.....	94
Figura 4-25 – Análise do ATR por camada do T2.....	95
Figura 4-26 – Evolução da área trincada e do ATR no T2.	95
Figura 4-27 – Comparação de dados de campo e previsão do MeDiNa para o T2.....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 – Métodos de cura da BSM (adaptado de Silva, 2019).....	26
Tabela 3-1 – Composição da mistura com CBUQ.....	40
Tabela 3-2 – Composição da mistura com gap-graded.	40
Tabela 3-3 – Composição da mistura com espuma de asfalto.	40
Tabela 3-4 – Cronograma de execução dos levantamentos.	46
Tabela 3-5 – Sequência de tensões para determinação do MR (DNIT 134/2018-ME).	52
Tabela 3-6 – Estado de tensão utilizado para determinação da deformação permanente da mistura estabilizada com espuma de asfalto (DNIT 179/2018-IE).....	52
Tabela 3-7 – Estado de tensão utilizado para determinação da deformação permanente para o material do subleito (DNIT 179/2018-IE).....	53
Tabela 3-8 – Ensaio laboratoriais realizados.	53
Tabela 3-9 – Avaliação do MR em diferentes condições de cura.	54
Tabela 4-1 – Caracterização do subleito.	56
Tabela 4-2 – Parâmetros do modelo composto material do subleito.	60
Tabela 4-3 – Módulo de resiliência médio do subleito.	60
Tabela 4-4 – Módulo de Resiliência com o AEMC.....	61
Tabela 4-5 – Parâmetros do modelo de deformação permanente de Guimarães (2009) para o material do subleito.	62
Tabela 4-6 – Caracterização da mistura estabilizada com espuma de asfalto.....	64
Tabela 4-7 – Parâmetros do modelo composto de MR para a mistura estabilizada.....	67
Tabela 4-8 – Equações do modelo composto de MR para a mistura estabilizada.	67
Tabela 4-9 – MR médio para diferentes métodos de cura.....	68
Tabela 4-10 – Módulo de Resiliência obtido pelo AEMC.....	68
Tabela 4-11 – Análise de umidade dos corpos de prova.....	69
Tabela 4-12 – Parâmetros do modelo de deformação permanente de Guimarães (2009) para o material da base.	71

Tabela 4-13 – Módulo de Resiliência CBUQ dos trechos T1 e T2.....	74
Tabela 4-14 – Deflexões corrigidas pela carga, temperatura e geofone.	82
Tabela 4-15 – Equações da correlação do Trecho T1.	84
Tabela 4-16 – Equações da correlação do Trecho T2.	84
Tabela 4-17 – Equações da correlação do Trecho T3.	84
Tabela 4-18 – Deflexões Trecho T1 – 22/02/2022.	85
Tabela 4-19 – Deflexões Trecho T1 – 30/05/2022	86
Tabela 4-20 – Configuração inicial das camadas para retroanálise para o T1.....	87
Tabela 4-21 – Retroanálise das bacias do dia 22/02 e do dia 30/05 para o T1.	88
Tabela 4-22 – Deflexões Trecho T2 – 22/02/2022.	89
Tabela 4-23 – Deflexões Trecho T2 – 30/05/2022.	89
Tabela 4-24 – Retroanálise das bacias do dia 22/02 e do dia 30/05 para o T2.	89
Tabela 4-25 – Deflexões Trecho T3 – 22/02/2022.	90
Tabela 4-26 – Deflexões Trecho T3 – 30/05/2022.	90
Tabela 4-27 – Retroanálise das bacias do dia 22/02 e do dia 30/05 para o T3.	91

1 INTRODUÇÃO

A construção e conservação de estradas são uma preocupação da sociedade desde os tempos antigos, pois é sinônimo de desenvolvimento e crescimento de cidades. No Brasil, país detentor de uma malha viária grande e notável, tal atividade é de suma importância, sendo imprescindível a melhoria das técnicas e projetos utilizados para a construção de um pavimento.

Os resíduos de obras de pavimentação, principalmente quando da execução de conservação e restauração de pavimentos, é capaz de gerar um passivo ambiental significativo. Entretanto, estes resíduos podem ser empregados nas diversas camadas do pavimento, principalmente no que se refere às camadas de base e de revestimento asfáltico. Na camada de revestimento, seu uso ainda é limitado, mas amplamente conhecido no Brasil. Quanto à camada de base, uma opção mais comum no âmbito internacional e que tem ganhado espaço no país, é a espuma de asfalto como material estabilizado com betume (ligante) junto ao material fresado.

A espuma de asfalto aplicada em camadas de base trata-se de um tipo de material estabilizado com betume, conhecido na literatura internacional como *Bitumen Stabilised Materials* (BSM). São materiais ligados de forma não contínua, cujo aglomerante da mistura é o ligante espumado. A mistura é composta pelo ligante aquecido e expandido, agregados, *filler*, e grandes proporções de material fresado (*Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP), a qual é capaz de atingir elevada resistência ao cisalhamento. Esta alternativa pode ser ainda utilizada com diferentes soluções de revestimento, que também podem contar com RAP em sua composição, fornecendo pavimentos de desempenho suficiente para tráfegos elevados.

A crescente demanda por investimentos em infraestrutura, bem como o interesse pela preservação dos recursos naturais, tem colocado em voga, cada vez mais, o estudo de soluções que possam alinhar o bom desempenho do pavimento à sustentabilidade. Soma-se a isso a resolução nº14/2021 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, que diz respeito ao uso do RAP nos projetos de engenharia de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias do órgão.

Atualmente, o RAP deve ser reaproveitado, com aplicação nas camadas do pavimento a serem construídas, devendo-se, inclusive, ser levado em consideração nas composições de custos dos

serviços nos quais será empregado. Com isso, o aproveitamento do material fresado apenas no revestimento, como é mais comumente feito no Brasil, pode não ser mais suficiente para o aproveitamento do material, sendo fundamental o estudo de novas técnicas de incorporação do fresado nas camadas estruturais dos pavimentos (base e sub-base). Outrossim, tendo em vista os dimensionamentos elaborados por métodos mecanístico-empíricos e as observações de campo, tem-se evidenciado a importância das camadas inferiores ao revestimento no tempo de vida útil do pavimento.

Nesse contexto, a Concessionária Auto Raposo Tavares - CART, na busca contínua de melhoria na qualidade de seus serviços, vem implantando pavimentos sustentáveis com materiais recicláveis nas principais camadas do pavimento. O material asfáltico removido do pavimento vem sendo utilizado no revestimento e na base, sendo neste último caso incorporado na tecnologia de espuma de asfalto. Em vista disso, a fim de contribuir com o desenvolvimento de pesquisas e soluções sustentáveis, a CART apoiou o Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (PPGG) da Universidade de Brasília (UnB) para elaboração desta dissertação.

Nessa direção, foram construídos trechos experimentais na rodovia SP-270, administrada pela concessionária, com soluções que incorporaram a utilização de material fresado. Foram previstas três diferentes estruturas de pavimento, todas com base de fresado com espuma de asfalto, cuja construção e monitoramento foram acompanhados para incorporação neste trabalho, visando o aperfeiçoamento da técnica, bem como as análises de desempenho correspondentes.

Buscando acelerar o processo de deterioração dos pavimentos, as espessuras das camadas de base e do revestimento foram reduzidas em dois dos três subtrechos. Assim, por meio de monitoramento das seções experimentais e da elaboração de ensaios de campo e laboratoriais, foi possível avaliar o desempenho do pavimento e compreender seu comportamento frente às ações do tráfego e do clima.

Além de preservar os recursos naturais, o pavimento sustentável pesquisado conta com uma tecnologia ainda não muito difundida no Brasil, com escassez de informações de ensaios e monitoramento de campo. Assim, esta pesquisa, além estudar uma solução mitigadora de impactos ambientais, decorrentes de exploração de jazidas naturais, emissões de gases de efeito estufa na atmosfera e redução de esforços (recursos humanos e maquinários), também contribuirá com os meios técnico e científico e indústria, estando em sintonia com a resolução

nº14/2021 do DNIT, que preconiza o uso do RAP em obras de restauração, adequação de capacidade e ampliação de obras viárias.

1.1. OBJETIVO

Este trabalho consiste na avaliação do comportamento da base estabilizada com espuma de asfalto junto ao material fresado, em conjunto a diferentes soluções de revestimento asfáltico, por meio de ensaios de campo e laboratoriais e do monitoramento periódico das condições funcional e estrutural de um Trecho Experimental (TE) composto por três subtrechos.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dentro da revisão bibliográfica, contextualizar os métodos e técnicas de aplicação de espuma de asfalto em camadas de base no Brasil, bem como os ensaios laboratoriais usualmente empregados para sua avaliação.
- Aplicar as recomendações do Guia PRO-MeDiNa (Publicação IPR-749) para esse tipo de pavimento, no que pertinente, para contribuir com a base nacional do Método de Dimensionamento Nacional - MeDiNa.
- Buscar a viabilidade para avaliação da base de espuma de asfalto com material fresado pelos ensaios mecânicos propostos pelo MeDiNa, em especial os de módulo de resiliência e deformação permanente, apresentando as peculiaridades existentes neste tipo de solução.
- Determinar as propriedades dos materiais das camadas dos subtrechos experimentais em laboratório e campo.
- Avaliar o efeito da cura no material estabilizado com espuma de asfalto por meio do ensaio de módulo de resiliência.
- Monitorar a evolução das condições funcional e estrutural do TE em função das ações do tráfego e do clima, incluindo análise os efeitos da consolidação da base de espuma de asfalto, por meio de monitoramento das bacias de deflexões e do afundamento de trilha de roda.

- Avaliar a previsão de danos do MeDiNa frente ao comportamento *in situ*, considerando a atual Função de Transferência (FT).
- Fornecer informações para construção de um banco de dados que possa contribuir com proposição de FT específica para o tipo de pavimento estudado.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, os quais estão descritos a seguir:

- O Capítulo 1 apresenta a introdução da pesquisa, indicando os principais aspectos abordados, a relevância e motivação deste trabalho, bem como os objetivos da dissertação.
- O Capítulo 2 apresenta a revisão de literatura, abordando os principais aspectos de reciclagem de pavimentos, características e comportamentos da espuma de asfalto, procedimentos para a construção de trechos experimentais, para o monitoramento pós-execução e os ensaios laboratoriais empregados para avaliação dos materiais componentes das camadas.
- O Capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa, abordando as etapas necessárias para construção e avaliação dos materiais que compuseram os trechos experimentais avaliados.
- O Capítulo 4 apresenta os resultados encontrados, bem como as análises e discussões realizadas no âmbito desta dissertação.
- Por fim, o Capítulo 5 aborda as conclusões obtidas e sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao tema.

2 RECICLAGEM DE PAVIMENTOS

A reciclagem em pavimentos asfálticos diz respeito ao reaproveitamento de material proveniente de pavimentos degradados, por meio do processo de fresagem total ou parcial da camada de revestimento, objetivando a construção de uma nova camada de pavimentação que atenda às exigências de projeto, apresentando benefícios econômicos e ambientais (Cunha, 2010).

Há diferentes técnicas de reciclagem de pavimentos, as quais se diferenciam, principalmente, em razão do local do processo de reciclagem, podendo ocorrer *in situ* ou em uma central de reciclagem de asfalto. De acordo com a ARRA (2001), as técnicas são divididas nos seguintes grupos: (i) a quente *in situ*; (ii) a quente em usina; (iii) a frio *in situ*; (iv) a frio em usina; (v) reciclagem profunda; (vi) e fresagem a frio.

Na reciclagem a quente, a mistura é composta, de acordo com o projeto de dosagem, por agregados miúdos e graúdos, junto a um material aglutinante (ligante asfáltico), os quais são misturados, distribuídos e compactados em condições aquecidas. No caso de reciclagem em usina, o RAP é combinado a novos materiais, muitas vezes juntos a agentes de reciclagem, os quais são misturados e, posteriormente, distribuídos no pavimento por um equipamento apropriado (Kandhal, P., & Mallick, R., 1997).

Para a reciclagem a quente *in situ*, no próprio local de aplicação, o pavimento é aquecido e amolecido, para então ser fresado até uma profundidade especificada (Kandhal, P., & Mallick, R., 1997). O material reciclado é combinado a novos materiais para confecção da nova camada, o qual é colocado no pavimento e compactado, assegurando a espessura desejada para a camada (Cunha, 2010).

Nos casos de reciclagem a frio em usina, o aquecimento do RAP ocorre apenas em contato com os agregados, não havendo necessidade de secagem e nem de aquecimento dos materiais. Neste caso, o material recuperado da rodovia é transportado até um depósito central (Mazzuco, 2019). Em geral, as usinas empregadas são mais simples e o material reciclado é aquecido apenas quando em contato com os agregados virgens, através de condução térmica (DNIT 033/2021-ES). Nesse tipo de reciclagem, há um maior controle do produto final.

A reciclagem a frio *in situ* utiliza um agente reciclador, adicionado proporcionalmente à quantidade de revestimento asfáltico recuperado (Mazzuco, 2019). Neste caso, utiliza-se grandes máquinas recicladoras, capazes de reciclar camadas espessas em uma única passagem. Esta técnica pode ser empregada com a adição de material betuminoso, como a espuma de asfalto e emulsões asfálticas, e estabilizantes químicos, como cal, cimento e cinzas volantes (Wirtgen, 2012).

Por sua vez, somente a fresagem a frio diz respeito à remoção controlada da camada do pavimento (fresagem), sem a utilização de calor. Geralmente é utilizada para preparação da área para a restauração do pavimento por meio de outras técnicas (Schreinert, 2017).

Finalmente, há a reciclagem profunda, que diz respeito ao método de reciclagem em que toda a seção do pavimento asfáltico e parte da camada subjacente de base são tratados para produzir uma camada de base estabilizada (Unger Filho, 2019).

No Brasil, o uso do material fresado se dá, principalmente, como RAP, na camada de revestimento, cuja porcentagem de agregado reciclado pode chegar, em alguns casos, a 100%. A depender das características do material fresado, pode-se adicionar determinados aditivos ou agentes de reciclagem, que conferem às misturas melhores condições (Wirtgen, 2012).

Entretanto, além do uso de RAP no revestimento, tem crescido, cada vez mais, seu uso na camada de base, por meio da reciclagem a frio *in situ*, utilizando misturas estabilizadas com ligante asfáltico, seja na forma de espuma asfalto, seja na forma de emulsão asfáltica. Ambas as soluções conseguem empregar grande aproveitamento de material fresado, sendo capazes de produzir pavimentos sustentáveis de bom comportamento.

2.1. MISTURAS RECICLADAS A FRIO ESTABILIZADAS COM LIGANTE ASFÁLTICO

De acordo com Sant'ana (2009), a estabilização asfáltica diz respeito a um processo de adição de ligante asfáltico aos solos, uma vez que estes solos em seu estado natural ou compactado podem não proporcionar características adequadas aos esforços solicitantes do tráfego. Segundo o autor, a estabilização de solos com materiais asfálticos em pavimentação justifica-se pela possibilidade de utilização de materiais locais e métodos de mistura na pista, incluindo a possibilidade de aproveitamento do material fresado.

Segundo Silva (2019), as misturas recicladas a frio podem ser estabilizadas com diferentes materiais, tal como ligantes asfálticos e hidráulicos (cal ou cimento), podendo ainda ter sua granulometria corrigida para formação de uma mistura com boa plasticidade e rigidez, com aumento de sua resistência e redução da susceptibilidade à umidade. Seu comportamento é dependente do teor e do tipo de estabilizante utilizado na mistura.

A depender do teor de asfalto empregado, seja na forma de emulsão asfáltica ou espuma de asfalto, bem como da dispersão desses estabilizantes na mistura e da cobertura dos agregados, a mistura estabilizada pode ter um aumento de flexibilidade e rigidez, bem como um aumento da resistência à umidade (Unger Filho, 2019).

Esse tipo de mistura é conhecido na literatura interacional como *Bitumen Stabilized Mixtures* (BSM). Os agentes estabilizantes mais empregados são a emulsão asfáltica e a espuma de asfalto, esta última objeto dessa pesquisa. Ambas as tecnologias constituem métodos que objetivam a redução da viscosidade do betume, permitindo que os agentes possam ser misturados com um material mais úmido e frio. Entretanto, são técnicas de produção totalmente distintas (TG2, 2020).

Para ser considerada como uma BSM, a mistura deve ser estabilizada com um teor máximo de 3% de emulsão ou espuma e um máximo de 1% de cimento Portland ou cal hidratada, estes dois últimos adicionados à mistura para desempenharem o papel de *filler* ativo. De acordo com Jenkins *et al.* (2007), nesta proporção, a mistura é capaz de apresentar um comportamento compatível ao de materiais granulares, melhorando o comportamento mecânico da mistura.

Ademais, a mistura reciclada com ligante asfáltico poderá não ser classificada como uma BSM caso possua um teor residual de asfalto (RAP) alto e ativo, sendo, portanto, enquadrada como uma mistura asfáltica. Neste contexto, são necessários estudos com métodos convencionais de dosagem, como Marshall e Superpave, pois seu comportamento mecânico dependerá, principalmente, das características termoviscoelásticas do ligante (Unger Filho, 2019).

A Figura 2.1 apresenta, em conjunto com os materiais usualmente empregados na pavimentação, as misturas estabilizadas com ligante asfáltico e sua tendência de comportamento a depender dos principais componentes dessa mistura.

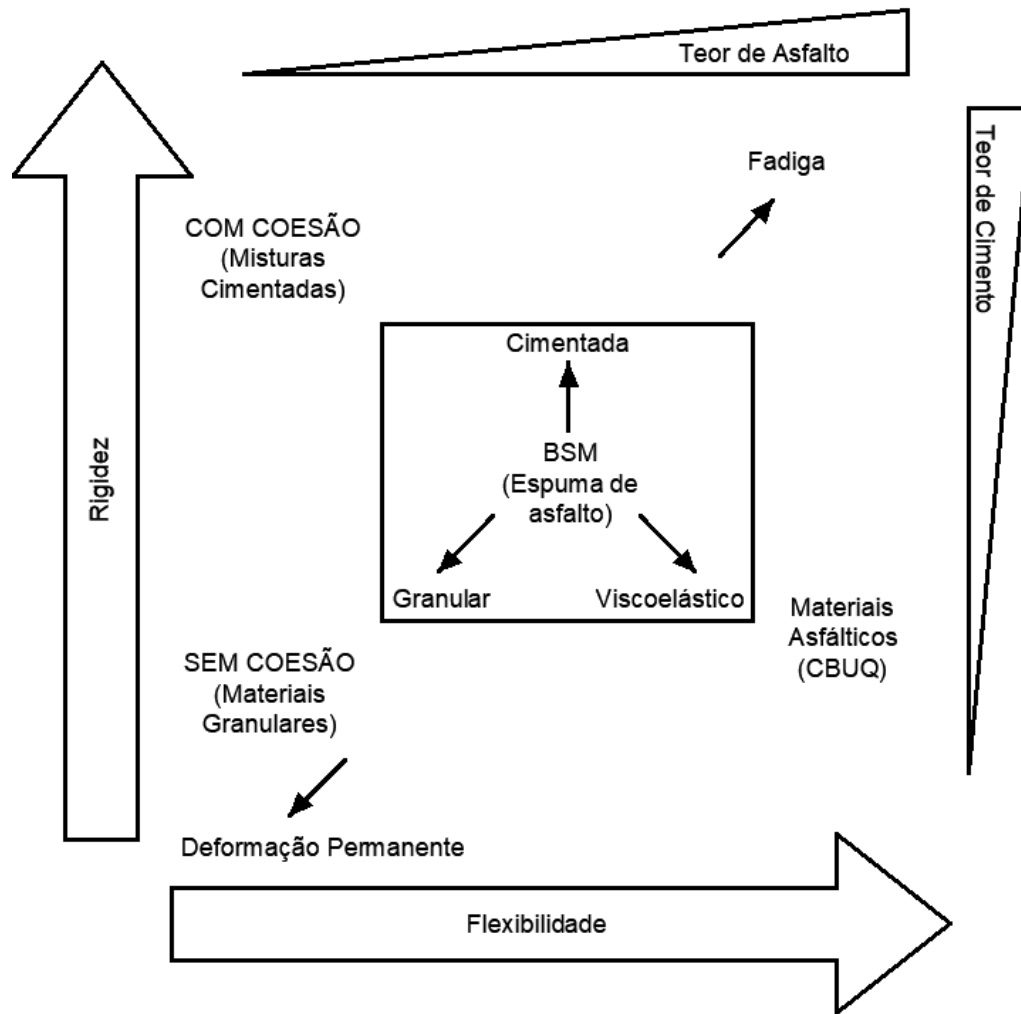


Figura 2-1 – Materiais empregados em pavimentação: relação de rigidez e flexibilidade.

Adaptado de Bonfim (2021).

À medida que o material apresenta uma composição mais granular, usualmente sem cimento, tem-se uma mistura menos coesa, cujo comportamento é mais influenciado pela tensão confinante. Nesse tipo de material, o comportamento à deformação permanente torna-se importante. Em contrapartida, com maiores adições de cimento, o material apresenta-se mais coeso, sendo mais dependente da tensão vertical, passando a exigir, a depender da composição, análises de fadiga. Neste caso, o aumento da tensão confinante não implica grandes diferenças no comportamento do material.

Em razão disso, os métodos de dosagem limitam o teor máximo de *filler* ativo, usualmente definido em 1%. Para teores superiores a essa porcentagem, a mistura passa a ter um comportamento mais semelhante a um material cimentado, com alta coesão, distanciando-se do comportamento esperado para uma mistura estabilizada com ligante.

Também é válido mencionar a influência das propriedades termoviscoelásticas. À medida que o teor de ligante aumenta, tem-se um material mais dependente do tempo e da temperatura, em que critérios de fadiga seriam importantes de serem analisados, por exemplo. É de se esperar, neste caso, considerações mais próximas de uma mistura asfáltica.

É possível ainda observar na Figura 3.1, que as BSM's se comportam de forma intermediária entre os materiais granulares e as misturas asfálticas. De acordo com Bonfim (2021), trata-se de um material ligado de forma não contínua, em que as trincas por fadiga não são consideradas como um critério de ruptura dominante, diferentemente da deformação permanente. Ressalta-se que o comportamento das BSM's depende da granulometria da mistura, bem como do *filler* empregado.

2.2. ESPUMA DE ASFALTO

Para a confecção de uma mistura estabilizada com espuma de asfalto, é necessário, inicialmente, entender o processo de produção do asfalto espumado. Como aponta Bonfim (2021), a espuma de asfalto consiste em um estado temporário do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), o qual é aquecido a temperaturas superiores a 160 °C, e se expande quando em contato com água e ar, em câmaras de expansão específicas, como ilustrado na Figura 2.2. Torna-se, dessa forma, um material menos viscoso, transformando-se, por um curto período, na espuma de asfalto. Quanto maior for o volume de espuma produzida, melhor será a distribuição do ligante espumado no agregado.



Figura 2-2 – Produção da Espuma de Asfalto (Wirtgen, 2019).

Uma vez produzida a espuma, seu controle durante o processo de usinagem é feito por meio da Taxa de Expansão (TE) e da Meia-Vida (MV). Estes parâmetros são, respectivamente, a razão entre o volume máximo da espuma em relação ao volume original de CAP; e o tempo necessário para reduzir a expansão máxima da espuma até a metade, conforme ilustrado na Figura 2.3 (Bonfim, 2021; Guatimosim, 2015). O teor de umidade do material antes de ser realizada a mistura é fundamental na dispersão do ligante e na aderência às partículas (Wirtgen, 2012).

Para o envolvimento do ligante aos finos da mistura, leva-se em consideração a meia vida, por se tratar do tempo em que a espuma se encontra no seu estado mais expandido e, em consequência, menos viscosa. Tendo sido transformada em espuma, este material é capaz de se misturar aos agregados, incluindo o RAP (Bonfim, 2021).

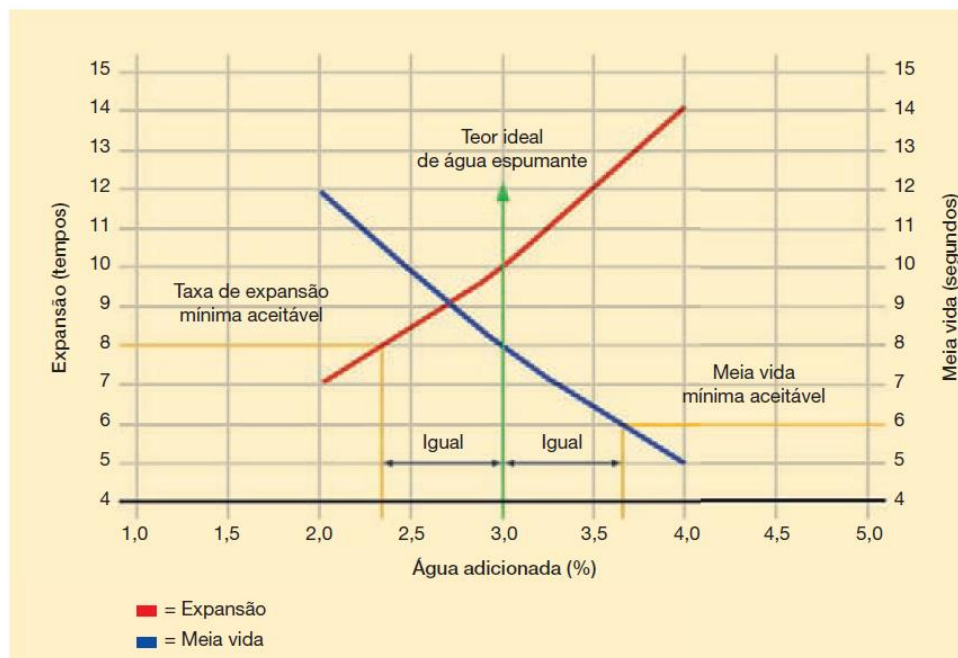


Figura 2-3 – Taxa de Expansão (TE) e Meia-Vida (MV) (Wirtgen, 2012).

A quantidade de água que é injetada no material espumado influencia diretamente nas características que a espuma terá. Com o aumento da taxa de aplicação, haverá uma maior expansão (maior TE), o que conduzirá a uma subsidência ou deterioração mais rápida da espuma e, conseqüentemente, uma meia vida menor.

Além disso, a temperatura é outro fator fundamental na qualidade de espuma. Temperaturas mais altas do ligante, em geral, criam uma espuma de melhor qualidade. De toda forma, é essencial tal análise em laboratório e a posterior verificação durante a produção da espuma na usina (Wirtgen, 2012).

2.3. MISTURA ESTABILIZADA COM ESPUMA DE ASFALTO

O estudo de camadas estabilizadas com ligante asfáltico, na literatura internacional, iniciou de forma mais aprofundada no ano de 2002, na África do Sul, resultando na publicação do primeiro manual de melhores práticas com o uso de espuma de asfalto, o *Technical Guideline – Bitumen Stabilized Materials – TG2*, que teve sua última versão atualizada no ano de 2020. Em resumo, o trabalho consiste em um guia com as diretrizes para o projeto e a construção de bases estabilizadas com betume por meio da utilização de espuma de asfalto e emulsão asfáltica.

Quanto à estabilização com emulsão asfáltica, esta consiste na suspensão de pequenas gotículas de betume na água. O betume é mantido em suspensão pela ação de um emulsificante, conferindo uma carga, positiva ou negativa, a depender do tipo de emulsificante. Quando misturado com o agregado à temperatura ambiente, a viscosidade relativamente baixa da emulsão permite umedecer as partículas, com foco nas partículas menores. Uma vez misturados, a emulsão se “quebra”, o que permite a aderência dos ligantes aos agregados (Wirtgen, 2012).

No que diz respeito à estabilização com espuma de asfalto, objeto desta pesquisa, tem-se uma mistura de agregados reciclados, um pequeno percentual de *filler*, e o ligante asfáltico espumado, que é o material aglomerante da mistura (Bonfim, 2021). Quando misturada aos agregados e demais componentes, ainda em seu estado de espuma, as bolhas de betume formadas estouram, produzindo pequenos estilhaços de betume que se dispersam pelo agregado, aderindo-se às partículas mais finas. Para os agregados reciclados, também componentes da mistura, as partículas de betume são capazes de se fixar ao ligante envelhecido do RAP em partículas mais grossas (TG2, 2020).

A combinação gera um material ligado de forma não contínua, que em função das características e da qualidade dos materiais que compõem a mistura, bem como do seu desempenho, podem ser classificadas em duas grandes classes: BSM 1 e BSM 2. Em linhas gerais, a BSM 1 possui uma mistura de melhor comportamento quando comparada a BSM 2, com maior resistência ao cisalhamento, em razão da influência dos melhores materiais utilizados na mistura. Assim, devido à sua composição e ao procedimento executivo, as BSM's, com o passar do tempo, passam a exibir um aumento significativo de coesão quando comparada ao material não tratado, adquirindo resistência à flexão e rigidez como resultado das propriedades viscoelásticas do betume disperso (TG2, 2020).

Em geral, o comportamento da BSM é semelhante ao de materiais granulares, porém com elevados níveis de coesão. A mistura é capaz de atingir resistência e rigidez à flexão como resultado das propriedades viscoelásticas do ligante adicionado, contudo, esse ligante não é conectado como em uma mistura asfáltica, o que produz uma ligação não contínua, conforme Figura 2.4, e, conseqüentemente, faz com que a mistura permaneça com as características granulares do material original. Logo, tem-se que a rigidez dessa mistura é dependente do estado de tensões, não sendo propensos ao trincamento por fadiga (TG2, 2020).

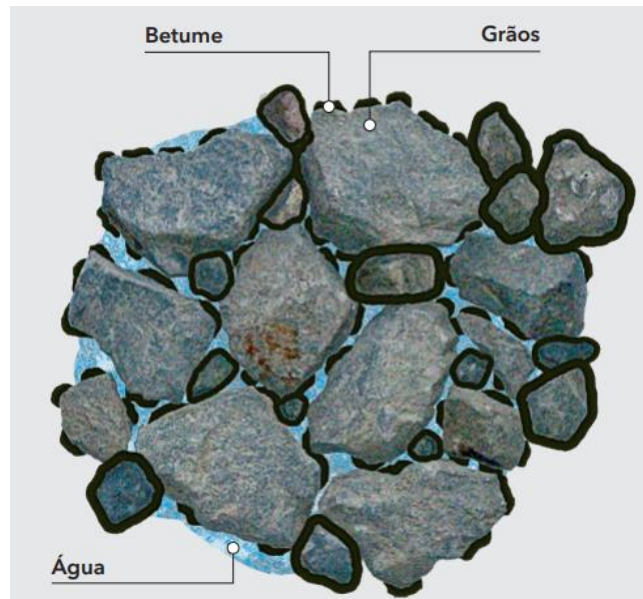


Figura 2-4 – Material ligado de forma não contínua (Wirtgen, 2019).

Para classificação como BSM's, os teores máximos de asfalto a serem empregados são de 3% de espuma de asfalto (ou emulsão) e no máximo 1% de cal ou cimento *Portland (filler)*. De acordo com o TG2 (2020), o teor ótimo de espuma em uma mistura estabilizada varia, usualmente, entre 1,7% e 2,5%. Dessa forma, as misturas possuem um comportamento mecânico mais próximo ao de materiais granulares, afastando-se do comportamento esperado para misturas asfálticas aplicadas em camadas de revestimento (Silva, 2019).

Quanto ao *filler* empregado na mistura, este auxilia principalmente melhorando a aderência entre o ligante e o agregado, bem como a dispersão do ligante na mistura. Além disso, reduz a plasticidade dos materiais e aumenta a dureza e a taxa de ganho de resistência da mistura (Wirtgen, 2012).

No que se refere aos principais mecanismos de falha, Bonfim (2021) os apresenta como sendo a deformação permanente e à suscetibilidade à umidade. A deformação permanente que, em geral, ocorre nos afundamentos de trilha de roda, evolui até que o material se acomode. O nível

de formação desse afundamento está intimamente relacionado ao teor de umidade e ao grau de compactação do material, em que quanto mais baixo for o teor de umidade, maior é a resistência da camada à deformação permanente. Já a suscetibilidade à umidade, como aponta Wirtgen (2012), corresponde ao dano causado pela exposição da espuma aos altos teores de umidade e às pressões dos poros induzidas pelo tráfego. Em razão do baixo teor de asfalto, os problemas de fadiga não são critérios de ruptura considerados nesse tipo de material, usualmente.

Jenkins *et al.* (2007) também aponta que o critério de ruptura da camada cujo agente de reciclagem é a espuma de asfalto está associada à deformação permanente, pelo elevado volume de vazios que esse tipo de mistura pode ter. Em vista disso, um critério a ser empregado para determinação a vida útil poderia ser a limitação do afundamento de trilha de roda (ATR).

Ebels *et al.* (2007) também apontam que as misturas, quando de fato estabilizadas, ou seja, enquadradas como BSM's, não se comportam como misturas asfálticas, logo, trincas por fadiga não são consideradas como um mecanismo de ruptura relevante. Assim, recomenda que não se utilize a resistência à tração como um parâmetro de projeto das BSM's, tal como é usualmente feito para misturas asfálticas. Afirma ainda que a redução da rigidez e da deformação permanente são os principais mecanismos de falhas das misturas estabilizadas com ligante.

Considerando as BSM's, os ensaios mais utilizados na mistura, de acordo com a prática atual, são ensaios triaxiais monotônicos, com avaliação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, como coesão e ângulo de atrito; ensaios de deformação permanente, realizado usualmente com o simulador de tráfego tipo LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*); ensaios de resistência à tração indireta na condição seca e saturada; e ensaios de módulo de resiliência (Guatimosim, 2015). Estes ensaios são os mais utilizados para o dimensionamento da mistura estabilizada com espuma de asfalto hoje no Brasil, ainda realizado por poucas empresas.

Como aponta o Manual da Wirtgen (2012), o procedimento para o projeto da mistura estabilizada com espuma de asfalto visa determinar o potencial da mistura em termos de resistência à deformação permanente (desempenho estrutural) e a resistência a umidade e deterioração (durabilidade).

Em resumo, no que se refere aos procedimentos do projeto de mistura indicados pelo TG2 (2020), uma vez definidas as características do asfalto espumado e tendo sido determinados os requerimentos para o emprego do *filler*, parte-se à determinação do teor ótimo de ligante. Esta é realizada por meio da confecção de cura dos corpos de prova, determinação da umidade após

moldagem e ensaios e, em seguida, a realização de ensaios de resistência à tração por compressão diametral nas condições seca e saturada.

No que diz respeito à produção da mistura, após a comprovação de adequação do material, bem como da realização dos ensaios necessários ao projeto de mistura, a produção pode ocorrer em usinas de asfalto específicas, adaptadas para injeção de ar e água no ligante para produção do asfalto espuma, conforme ilustra um exemplo de usina móvel da empresa FREMIX, apresentada na Figura 2.5.



Figura 2-5 – Usina Móvel KMA 220.

O processo de produção na usina é iniciado após a entrada dos materiais, como o RAP e *filler*, nas granulometrias adequadas. Em outro ponto, é permitida a entrada de ligante asfáltico que seguirá ao processo de produção da espuma. Após o processo de espumação, por meio da injeção de água e ar sob pressão, o ligante espumado é misturado ao material fresado e ao *filler*, nas quantidades do projeto de dosagem. Após esse processo, obtém-se a mistura final. Todos estes processos são monitorados por um painel de controle na cabine de comando da usina. Realizadas estas etapas, caso o *filler* empregado seja a cal, o material pode ser estocado em pilhas para posterior aplicação em campo, desde que mantidas as condições de umidade adequadas.

2.4. AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS POR TRECHOS EXPERIMENTAIS (TE)

Para a avaliação do comportamento de uma determinada solução por meio da construção de trechos experimentais, atualmente, no Brasil, tem-se como uma das principais referências as técnicas o Guia PRO-MeDiNa (Publicação IPR 749), idealizado no âmbito do Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa. Em resumo, o Guia padroniza os procedimentos a serem seguidos na construção de trechos experimentais, orientando desde as etapas de coleta do material e ensaios a serem feitos, até a etapa de monitoramento das deflexões, área trincada, entre outros parâmetros, buscando contribuições para a melhoria da função de transferência do MeDiNa. A função é a parte empírica do método, pois busca refletir a relação entre os resultados dos ensaios laboratoriais dos materiais e o desempenho destes *in situ* trabalhando frente às ações do tráfego e do clima.

Os procedimentos apresentados no Guia PRO-MeDiNa alinham-se, em muitos aspectos, aos objetivos pretendidos pelos trechos implementados pela Concessionária Auto Raposo Tavares – CART, com relação à avaliação da base estabilizada reciclada com espuma de asfalto e dos demais materiais componentes das camadas. Ou seja, com a execução dos ensaios preconizados, em conjunto com a avaliação *in situ* dos defeitos, deflexões e demais ocorrências relevantes do pavimento, pode-se avaliar o seu desempenho.

Buscando à avaliação do comportamento dessa e de outras soluções de pavimentação, a construção de trechos experimentais constituem uma forma eficaz e importante para este objetivo. Devido a pequena extensão dos segmentos experimentais, é possível efetuar a coleta de materiais e realizar ensaios, bem como realizar o acompanhamento da evolução das condições funcional e estrutural dos pavimentos, obtendo um maior nível de detalhe com levantamentos em um menor intervalo de tempo.

Tendo em vista que a Função de Transferência (FT) do MeDiNa foi concebida para pavimentos flexíveis convencionais, por meio dos dados da pesquisa torna-se possível obter resultados para a formulação de um banco de dados com novas e diferentes soluções, visando à elaboração de futuras funções para este tipo de material.

Conforme apresenta Silva (2022), pode-se comparar o TE com um modelo físico na escala 1:1, em que o conjunto de camadas de diferentes materiais de construção, que compõem a estrutura do pavimento, é solicitado por carregamentos e ações climáticas reais, ensaiado por meses e/ou anos, cujos parâmetros de interesse são monitorados periodicamente. Para pavimentos flexíveis, os parâmetros de controle são as deformações elásticas e plásticas, refletidas no pavimento,

respectivamente, por meio do trincamento no revestimento (área afetada) e afundamento em trilha de roda, consequentes do processo de fadiga da camada asfáltica e das deformações permanentes do conjunto de camadas, que diminui com a profundidade.

Para um melhor entendimento destas manifestações na superfície do pavimento, as condições mecânicas dos materiais das camadas são verificadas por meio de ensaios não destrutivos, tais como medidas de bacias de deflexão, e/ou destrutivos, abrindo-se poços de inspeção para avaliação das camadas *in situ* (medidas dos afundamentos em cada camada e ensaios de campo) e coleta de materiais, para casos de reavaliação de suas propriedades por meio de ensaios.

Os resultados são confrontados com aqueles obtidos nos ensaios laboratoriais, realizados antes da implantação dos trechos experimentais, em que se destacam as propriedades mecânicas dos materiais sob carregamentos cíclicos com diferentes estados de tensão (relações entre as tensões desvio e confinante). Ressalta-se, entretanto, que os materiais são ensaiados individualmente e as condições de contorno são bem distintas daquelas encontradas em campo. Por exemplo, a frequência de carregamento não reflete o espectro de carga do tráfego, o estado de tensão-deformação *in situ* é influenciado por tensões horizontais residuais resultantes do efeito da compactação e das variações de temperatura e pluviosidade diárias, entre outras. Portanto, análises dos resultados do desempenho do pavimento e dos ensaios contribuem para uma melhor compreensão da resposta do conjunto de camadas solicitadas pelas ações do tráfego e climáticas, que objetiva a redução da parcela de empirismo inerente aos métodos mecanísticos de dimensionamento e previsão de desempenho de pavimentos. Ainda segundo o autor, esses seriam o entendimento e objetivos dos TE, sendo, portanto, importante aumentar a quantidade de trechos para os diferentes tipos de pavimento e regiões climáticas do Brasil, seguindo o Guia PRO-MeDiNa, visando à construção de uma base de dados nacional que permita elaboração de Funções de Transferência (FT) específicas para a região e tipo de pavimento.

Nesse contexto, Guatimosim (2015) apresenta os resultados do monitoramento de três diferentes trechos de duas rodovias com alto volume de tráfego com a utilização de estabilização com espuma de asfalto na camada de base. Apresenta diferentes soluções de pavimentação, em que por meio do acompanhamento de deflexões, retroanálises, avaliações funcional e estrutural, bem como a caracterização dos materiais por meio de ensaios, consegue avaliar o comportamento do material. Os resultados obtidos mostraram que as camadas estabilizadas com espuma de asfalto podem ser utilizadas como solução eficiente para tráfegos elevados, capaz de manter adequados desempenho e estrutura da camada.

Guatimosim (2019) acompanhou três diferentes seções de trechos experimentais localizados nas Rodovias Ayrton Senna (SP-070) e Fernão Dias (BR-381/SP), cujo pavimento foi restaurado com a aplicação de uma base reciclada com espuma de asfalto, com o objetivo de avaliar o comportamento mecânico e o desempenho de uma mistura, buscando entender os efeitos do confinamento e do teor de umidade do material. O autor concluiu que as deflexões reduziram significativamente após 24 meses. Verificou também que a cura do material, em razão da saída de água, é uma consideração importante, tanto no que diz respeito à sua duração, como com relação ao efeito no comportamento do material.

Martinez *et al.* (2013) apresentam estudos de retroanálise para estimativa dos módulos das camadas de um pavimento reciclado com espuma de asfalto, por meio da monitoração de um trecho situado no km 35 da Rodovia Ayrton Senna. Os resultados comprovaram o ganho de coesão e de resistência da base de espuma com o tempo, observando a estabilização das deflexões no período entre 180 e 270 dias, contados a partir da data de execução.

Barreta (2011), no que diz respeito à aplicação de reciclagem de pavimentos asfálticos com espuma de asfalto para utilização em bases de pavimentos, foi uma das primeiras pesquisas a realizar um estudo comparativo, por meio da utilização de um trecho experimental, comparando duas tecnologias diferentes: uma com o método tradicional, com a utilização do equipamento Wirtgen 2500, e outro com a usina móvel KMA 220, obtendo bons resultados em ambas.

Huan *et al.* (2010) realizaram um estudo com espuma de asfalto na Austrália Ocidental, apresentando procedimentos de mistura com a construção de um projeto teste com estabilização da espuma de asfalto. Com base nos resultados obtidos, conseguiu definir uma proporção ideal de agregados virgens, com uma mistura de base de rocha britada e calcário britado, apresentando comportamento mecânico com bom desempenho.

Andrade *et al.* (2016) avaliaram, por meio de levantamentos deflectométricos com o equipamento FWD, no período de um ano e meio, quatro trechos experimentais construídos na Rodovia Fernão Dias (BR-381). Os trechos contavam com aproximadamente 100 m cada, sendo o primeiro de base de brita graduada simples, o segundo de base de brita graduada tratada com cimento, o terceiro com base composta por RAP estabilizado com emulsão asfáltica, e último com base composta por RAP estabilizado com espuma de asfalto. Em seu estudo, buscou avaliar o uso dos parâmetros de bacia para avaliação do comportamento estrutural do pavimento. Com base nos resultados encontrados, observou que para as camadas estabilizadas com emulsão e espuma, os parâmetros indicaram um processo de ganho de rigidez nos

primeiros meses de operação dos trechos, em razão do processo de cura (saída de água) das camadas. Já para a camada de base granular, houve fadiga precoce para o alto tráfego, enquanto para a camada de base cimentada os parâmetros da bacia indicaram alta rigidez, com manutenção da integridade da camada.

Jetkins *et al.* (2007) observou o comportamento de camadas de pavimento com BSM's a longo prazo. Percebeu que durante a vida útil, a cura da mistura provoca um aumento da rigidez da camada. Esta é, em muitos casos, relativamente baixa no curto prazo, podendo levar o pavimento a sofrer problemas tanto durante a construção, quanto no momento da abertura ao tráfego, onde passa a sofrer as ações das cargas. Dessa forma, a deformação permanente no pavimento pode vir a se tornar crítica, prejudicando sobremaneira a qualidade do rolamento. Contudo, se devidamente dimensionado, o ganho de rigidez na camada após um tempo torna-se extremamente relevante.

Godenzoni *et al.* (2017) avaliou, em campo, o comportamento de diferentes misturas recicladas a frio na sub-base de um pavimento, entre elas uma com 3% de asfalto espuma e 1,75% de cimento e outra com 3% de emulsão asfáltica e 2% de cimento. Em ambos os casos, concluiu que as misturas apresentaram um aumento de rigidez na camada em razão da cura do estabilizantes empregados, comportamento que se estendeu até 3 a 5 anos após a construção do pavimento.

Assim, diante das experiências obtidas por meio da implementação de trechos experimentais, e tendo como referência as orientações passadas pelo Guia PRO-MeDiNa, na sequência são apresentados os métodos para a avaliação de trechos experimentais, tanto no que se refere ao monitoramento em campo, quanto aos ensaios laboratoriais.

2.4.1. AVALIAÇÃO FUNCIONAL E ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS

A avaliação funcional de um determinado pavimento, como aponta Bernucci *et al.* (2010), relaciona-se à apreciação da sua superfície e como isto influencia no conforto ao rolamento do usuário. Há diversos métodos capazes de avaliar o comportamento do pavimento, entre eles a avaliação objetiva, em que a condição da superfície do pavimento é analisada através do levantamento de defeitos. Dentre esses defeitos, destacam-se dois: Afundamento de Trilha de Rodas (ATR) e Trincas.

O ATR refere-se a uma deformação permanente, caracterizada por uma depressão na superfície de um pavimento, que pode ser acompanhada de uma compensação volumétrica lateral, causada

principalmente pela fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento, pelo excesso de ligante na mistura, entre outras causas. Este tipo de defeito é observado em diversas rodovias brasileiras, e está intimamente relacionado à deformação permanente do pavimento, seja ela relacionada ao revestimento ou às demais camadas da estrutura (Hómez, 2014).

O método empregado para sua determinação, especificado na norma DNIT 006/2003-PRO, indica a utilização de uma treliça metálica, com uma haste móvel, a qual é posicionada sobre o afundamento, sendo medidas as profundidades do defeito no pavimento. Outro método empregado para a determinação do ATR é por meio dos perfilômetros inerciais, que realizam as medições através de um carro em movimento acoplado aos equipamentos necessários, obtendo uma coleta automatizada das leituras.

Com relação às trincas, estas são uma espécie do gênero fendas, o qual conta ainda com a espécie fissuras. Estas, de acordo com a norma DNIT 005/2003 – TER, são pequenas aberturas perceptíveis a olho nu à distância inferior à 1,5 m, enquanto as trincas possuem uma abertura superior às fissuras. Elas podem vir a aparecer no pavimento em razão da deficiência do material, falhas no processo construtivo, erros de dimensionamento, fadiga, entre outros. De acordo com Bernucci *et al.* (2010), temperaturas baixas também podem provocar um trincamento por retração, podendo causar um enrijecimento da mistura que, se pouco espesso, fica mais suscetível ao trincamento por fadiga.

O trincamento por fadiga é um dos principais defeitos considerados na avaliação de pavimentos, sendo parâmetro de controle, inclusive, para dimensionamentos mecanístico-empíricos de pavimentos. Sua avaliação se dá em termos de área trincada, sendo normatizado pela DNIT 433/2021-PRO, para o levantamento de defeitos em trechos experimentais, bem como pela norma DNIT 007/2003 – PRO. De forma geral, as normas indicam a utilização de uma grelha, onde busca-se quantificar a quantidade de área trincada presente no pavimento, entretanto, trata-se de um levantamento por amostragem, o que pode falsear o valor real do trincamento.

Além da avaliação funcional, com a realização do levantamento de defeitos, emprega-se também a avaliação estrutural em pavimentos visando à análise de sua condição. Dentre os métodos mais empregados para essa análise, destacam-se as leituras deflectométricas, as quais podem ser realizadas por diversos equipamentos, entre eles o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) e a Viga Benkelman (VB). As bacias de deflexão obtidas por estes equipamentos devem ser analisadas considerando os distintos princípios de funcionamento de cada um. Em linhas

gerais, a principal diferença consiste na forma de aplicação do carregamento, sendo do FWD mais próximo de uma condição dinâmica e a VB, de uma condição estática.

O FWD, o qual possui um carregamento por impacto, é capaz de medir os deslocamentos elásticos de um pavimento, por meio da queda de um peso suspenso a uma determinada altura, fornecendo valores de deflexão. Assim, quando realizadas em vários pontos, nos quais as distâncias são previamente definidas, é possível medir a bacia deflectométrica de um pavimento, podendo-se estimar os módulos de elasticidade das camadas por meio do processo de retroanálise (Bernucci *et al.*, 2010).

A retroanálise, como mencionado, trata-se de um método capaz de inferir os módulos de elasticidade das camadas de um pavimento por meio da análise da bacia de deflexão, tendo conhecimento da estrutura do pavimento e carga aplicada. Segundo Nóbrega (2003), possuindo o conhecimento do carregamento que está sendo aplicado no pavimento para obtenção da bacia de deflexão, e de posse das características dos materiais que compõem as camadas (coeficiente de Poisson, tipo de material, condições de aderência), bem como de sua espessura, conforme mostrado na Figura 2.6, é possível obter os valores de módulo. Com isso, além de ser um método não destrutivo, fornece rapidez e praticidade nos levantamentos.

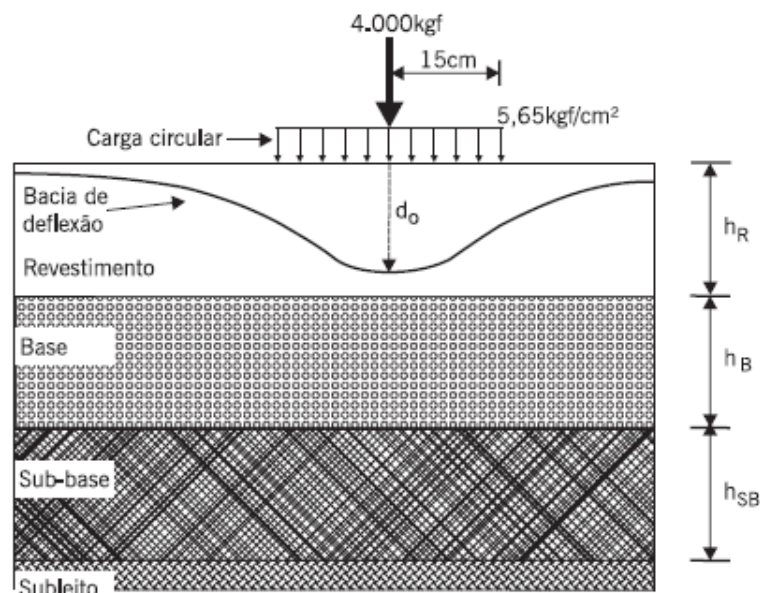


Figura 2-6 – Dados necessários para retroanálise (Nóbrega, 2003 *apud* Bernucci *et al.*, 2010).

Outra forma de obtenção da bacia de deflexão é por meio da Viga Benkelman. Diferentemente do FWD, a viga trabalha com um carregamento quase-estático, que necessita de um caminhão com eixo traseiro simples carregado com a carga padrão de 8,2 t para aplicação do carregamento no pavimento. Uma vez que a viga esteja posicionada corretamente no eixo entre os pneus da

roda traseira, é possível realizar as medidas das deflexões com um extensômetro posicionado no equipamento, à medida que o caminhão vai se afastando. Assim, é possível determinar a bacia de deflexão e, novamente, realizar a retroanálise para obtenção dos módulos de elasticidade.

Vale ressaltar que, apesar de ambas fornecerem as bacias, os resultados são diferentes, principalmente em razão do tipo de carregamento aplicado. Porém, a viga trata-se de um equipamento mais simples, de conhecimento habituado dos engenheiros de pavimento, sendo comum seu uso nas mais diversas obras.

Em razão disso, encontra-se na literatura estudos que objetivam o estabelecimento de correlação entre as deflexões máximas medidas com ambos os equipamentos, sendo recomendado algumas correlações no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do DNIT (Publicação IPR 720). Tal recomendação tem relação com os métodos que vinham sendo usados (DNER-PRO 269/94, DNER-PRO 010/79 e DNER-PRO 011/79), que consideram as deflexões máximas fornecidas pela VB para o dimensionamento do pavimento.

Com o avanço das técnicas de pavimentação no Brasil, o uso do FWD passou a ser mais comum, devido à sua alta produção e menor risco operacional da rodovia. Medina *et al.* (1994) aponta que há certa dificuldade na obtenção das correlações entre os equipamentos, não existindo uma correlação única. Contudo, também aponta que elas somente devem ser utilizadas se forem compreendidas as condições de ensaio, pois são muito dependentes das estruturas ensaiadas, das condições climáticas e do modo de carregamento.

Logo, apesar das limitações do uso de correlações, é possível obter relações confiáveis se forem realizados levantamentos com ambos os equipamentos em um mesmo tipo de pavimento e com intervalo de tempo muito baixo, para manter as condições de contorno, principalmente a temperatura, e assim obter correspondências mais confiáveis entre os valores, podendo ser aplicáveis aquele trecho em específico. Para haver uma boa abrangência de valores de deflexão, é necessário que sejam realizados os levantamentos com o FWD e VB neste mesmo tipo de pavimento, mas com condições estruturais em diferentes níveis de degradação.

Por fim, somando-se às avaliações que podem ser realizadas em campo para obtenção de parâmetros dos pavimentos, vale citar o Geogauge (*Soil Stiffness Gauge – SSG*), que diz respeito a um medidor da rigidez de solos compactados, de forma direta.

Este equipamento foi desenvolvido nos Estados Unidos, em parceria com a FHWA (*Federal Highway Administration*), com o objetivo de buscar substituir os métodos tradicionais de

controle de qualidade de pavimentos (ensaios de massa específica e umidade *in situ*). Em linhas gerais, esse equipamento mede rigidezes de 3 a 70 MN/m e Módulos de Young entre 26,2 a 610 MPa (Maia, 2016).

Seu princípio de funcionamento é, basicamente, por meio da produção de vibrações transmitidas à superfície da camada de solo, surgindo forças que o equipamento aplica a essa superfície, as quais são capazes de produzir determinados deslocamentos (Mendes, 2013). Ainda, ele é capaz de medir a tensão imposta à superfície do material (mede a impedância da superfície do solo), bem como a velocidade resultante, como uma função do tempo, obtendo, assim, a rigidez do material, que é a razão entre a força e a deflexão, que resulta diretamente da medida de impedância. Com base nessa rigidez, é possível obter o módulo de deformabilidade ou resiliência, considerando o problema sobre um espaço linear, homogêneo e isotrópico (Maia, 2016).

Portanto, tendo em vista a facilidade de utilização do equipamento em campo, bem como as leituras que é capaz de realizar, o Geogauge foi empregado nas camadas do TE, visando à análise de rigidez da camada após a fresagem do pavimento.

2.4.2. AVALIAÇÃO DOS MATERIAIS POR ENSAIOS LABORATORIAIS

Além do acompanhamento *in situ* dos pavimentos durante e pós-construção, é fundamental a avaliação dos materiais componentes das camadas com a realização de ensaios laboratoriais, objetivando obter suas características e propriedades e, assim, entender o comportamento destes materiais quando associados (sobrepostos), formando a estrutura do pavimento submetida ao carregamento cíclico. Visto envolver estados de tensões e deformações, tais estudos são realizados por meio de modelagens numéricas, que podem ser comparadas com as observações de campo, quando há o acompanhamento do desempenho do pavimento, iniciado, preferencialmente, logo após a abertura ao tráfego.

Como já abordado, as pesquisas mais difundidas no mundo quanto ao estudo de misturas recicladas estabilizadas ocorreram na África do Sul. Os ensaios laboratoriais utilizados para a metodologia de projeto envolvem ensaios triaxiais monotônicos e de carga repetida em grandes amostras, bem como ensaios de resistência à tração indireta, Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Limites de Atteberg para definição do limite de plasticidade. Entretanto, alguns estudos têm abordado outros ensaios para avaliação desse tipo de mistura, buscando alinhamento com os ensaios necessários para elaboração de análises mecanicistas de dimensionamento de

pavimentos com materiais semelhantes. No Brasil, tem-se realizados estudos (Silva, 2019; Kuchiishi, 2019; Andrade, 2017; Guatimosim, 2015; Bessa *et al.*, 2016), entretanto, são poucos e não há consenso sobre os procedimentos de ensaios e, portanto, sem uma padronização.

Silva (2019) buscou avaliar o comportamento à deformação permanente de misturas a frio estabilizadas tanto com asfalto espumado, quanto com emulsão asfáltica, por meio de resultados obtidos em ensaios de *Flow Number* adaptados. Os resultados por ele obtidos demonstraram, em linhas gerais, uma melhora no desempenho das misturas recicladas a frio com maior tempo de cura, não ocorrendo deformação permanente ao longo do ensaio. Além disso, observou que misturas estabilizadas com emulsão apresentaram maior dependência da temperatura e da tensão vertical quando comparadas às misturas estabilizadas com asfalto espuma.

Kuchiishi (2019) estudou quatro diferentes tipos de misturas, sendo três delas com material fresado. Duas dessas misturas contaram com o uso de espuma asfalto, sendo uma com adição de 1% cal hidratada e outra com adição de 2% cimento como *filler*. Em seus resultados, por meio de ensaios triaxiais de módulo de resiliência, mostrou que misturas com adição de cimento apresentaram comportamento similar aos materiais cimentados, com valores de módulo resiliente aproximadamente constantes para diferentes tensões de confinamento. Já para as misturas espumadas com adição de cal hidratada, tem-se um comportamento semelhante ao de materiais granulares, dependentes da tensão confinante. Além de resultados de ensaios triaxiais, Kuchiishi (2019) também realizou ensaios de módulo dinâmico nas misturas estudadas. Observou que todas as quatro misturas apresentaram um comportamento viscoelástico, o qual é influenciado pelo tipo de ligante e pela temperatura. Ressaltou que há incertezas quando se assume apenas um tipo de comportamento para a mistura, ou seja, totalmente granular ou totalmente viscoelástico.

Andrade (2017) avaliou em campo e em laboratório quatro trechos experimentais na rodovia Fernão Dias (BR-381), em que umas delas era uma mistura espumada com material fresado, com adição de 2% de cimento como *filler*. Em ensaios laboratoriais triaxiais de módulo de resiliência em função da tensão de confinamento, foi observada pouca variação das tensões aplicadas, obtendo-se um modelo constante. Ou seja, a mistura não se mostrou dependente da tensão confinante.

Guatimosim (2015) avaliou uma mistura espumada com material fresado com adição de 1% de cal, a fim de avaliar o efeito do confinamento, bem como a influência da cura no comportamento à rigidez do material. Observou que a rigidez do material variou em relação à tensão confinante

aplicada, mas não foi possível avaliar de forma eficiente o efeito da cura no módulo de resiliência. Contudo, nota-se uma clara tendência de aumento de rigidez para todos os períodos de cura estudados, quando se analisa o efeito do confinamento.

Bessa *et al.* (2016) realizou uma proposta de projeto de misturas recicladas a frio utilizando como estabilizantes a emulsão asfáltica e o cimento Portland. Dentre seus estudos, realizou análises a fim de verificar qual o tempo de cura e os métodos de compactação adequados para a análise da mistura, pois, segundo suas pesquisas, concluiu que os procedimentos de caracterização e controle das misturas recicladas a frio ao redor do mundo não estão em acordo. Em seus resultados mostrou que a compactação Marshal apresenta resultados similares quando variados o teor de emulsão asfáltica e cimento, enquanto a compactação Proctor foi capaz de capturar da melhor forma a influência dos materiais. Além disso, concluiu que temperaturas mais altas de cura são capazes de prover benefícios no projeto de misturas recicladas a frio com emulsão asfáltica, pois suas características mecânicas podem ser atingidas com um menor tempo de cura quando utilizada a temperatura de 25 °C, a qual é mais usual.

Apresentou também resultados de cura de 1, 7 e 28 dias, para as temperaturas de 40°C, 60°C e 100°C. Na temperatura de 40°C após 1 dia, os CP's apresentaram valores de resistência à tração indireta similares ao tempo de cura de 25°C aos 7 dias. Aumentando o período de cura para 7 dias, à 40°C, aumentou-se ainda mais a resistência, esta que foi maior ainda à 60°C, pelo mesmo período. Já com 100°C a 7 dias, os resultados foram inferiores quando empregada a temperatura de 60°C, isto porque, possivelmente, para maiores temperaturas, começa a haver a deterioração interna da mistura. Assim, apesar do estudo apresentado por Bessa *et al.* (2016) tratar-se de emulsões asfálticas, diz respeito a misturas estabilizadas a frio, cujo comportamento de cura e compactação podem ser semelhantes, empregando-se, com as devidas ressalvas, o comportamento à mistura estabilizada com espuma de asfalto.

Tebaldí *et al.* (2014), no que se refere à compactação desses materiais, menciona que a compactação por impacto (Proctor ou Marshall) é mais recomendada quando a mistura reciclada a frio for adotada como uma mistura de material granular melhorado, enquanto métodos de compactação giratório ou vibratória são mais eficazes para misturas de comportamento mais próximo ao de um concreto asfáltico.

2.4.3. PROCEDIMENTOS DE CURA DA BSM

Um dos processos mais importantes para o alcance das adequadas propriedades mecânicas da BSM é a cura, processo onde a água é progressivamente removida da mistura após reações de hidratação, evaporação e drenagem. Para as misturas estabilizadas com espuma, a umidade atua favorecendo a dispersão da espuma durante a execução da mistura, o que facilita a suspensão dos agregados finos para o contato com a espuma de asfalto. Contudo, na literatura, não há um consenso quanto ao processo de cura adequado, sendo possível encontrar diferentes procedimentos (Silva, 2019).

Como aponta Tebaldi *et al.* (2014), os procedimentos de cura feitos têm adotado temperaturas entre 20° e 60° C, sendo, em alguns casos, a temperatura de 60°C considerada muito elevada, mostrando-se a de 40°C mais adequada. Quanto ao tempo, também não há consenso. O autor cita que não é simples definir um procedimento de cura que consiga simular o que acontece em campo para que se possa atender todos os tipos de mistura em todas as condições climáticas.

Guatimosim (2015), como já abordado anteriormente, avaliou em seus estudos o efeito da cura da BSM com ensaios de módulo de resiliência. Concluiu que ela é uma consideração importante tanto com relação à sua duração, quanto com relação ao seu efeito no comportamento do material. Contudo, nos ensaios, apesar de perceber a variação de resultados causada pela tensão confinante, não foi possível estabelecer de modo eficiente o efeito da cura seca (realizada a 25°C) no valor de módulo.

A fim de tentar avaliar o efeito da cura, propôs então outro método, que chamou de cura úmida. Neste processo, logo após a compactação, as amostras foram seladas com sacos plásticos a fim de conservar a umidade do material, realizando este processo por 1, 7 e 28 dias. O autor percebeu que a cura de 7 dias apresenta melhores resultados de módulo quando comparada à cura de 1 dia. Contudo, para 28 dias, o módulo já decaiu, o que pode estar relacionado a um dano por umidade causado pela extensão do período de cura úmida.

A Tabela 2.1, apresentada por Silva (2019), indica os diversos tipos de cura adotados em laboratório, por diferentes pesquisadores. O que já foi abordado por esses diversos autores, com mais segurança, é que a cura influencia no desempenho da camada, na rigidez do material e na probabilidade de ocorrência de deformação permanente.

Tabela 2-1 – Métodos de cura da BSM (adaptado de Silva, 2019).

País	Fonte	Ligante Asfáltico	Dimensão da amostra (mm x mm)	Procedimento de cura
África do Sul	Asphalt Academy (2009) <i>apud</i> Silva (2019)	Espuma ou emulsão	100 x 63	72h a 40° C com amostras não-ensacadas
		Emulsão	150 x 127	26h a 30°C com amostras não-ensacadas + 48h a 40°C com amostras ensacadas
	Espuma	150 x 127	20h a 30°C com amostras não-ensacadas + 48h a 40°C com amostras ensacadas	
	Jenkins <i>et al.</i> (2007)	Espuma	150 x NE	28 dias a temperatura controlada (fora do molde)
Alemanha	Wirtgen (2012)	Espuma	100 x 63,5 ou 150 x 95	Cura seca: 72h a 40°C ou até a amostra atingir massa constante
		Espuma	150 x 95	Simulação de campo: 20h a 30°C ou até a umidade atingir 50% da umidade ótima
		Emulsão	100 x 63,5 ou 150 x 95	Cura seca: 72h a 40°C ou até amostra atingir massa constante
		Emulsão	150 x 95	Simulação de campo: 24h a 30°C ou até a umidade atingir 50% da umidade ótima
Brasil	DNIT-ES 169/2014	Espuma	100 x 63,5 ou 150 x 95	72h a 40°C
	Bessa <i>et al.</i> (2016)	Emulsão	100 x 200	1 dia a 60°C
	Guatimosi m <i>et al.</i> (2015)	Espuma	100 x 200	Cura seca: 3, 7, 14, 28 e 60 dias a 25°C com amostras não-ensacadas. Cura úmida: 1, 7 e 28 dias a 25°C com amostras ensacadas
Estados Unidos	ARRA (2017)	Espuma	100 x 63,5	Mínimo de 16h a 40°C e máximo de 72h até a atingir massa constante
	Fu <i>et al.</i> (2010)	Espuma	150 x 300	24h a 20°C com amostras ensacadas e 7 dias a 40°C com amostras não-ensacadas

2.4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A avaliação dos materiais componentes das camadas de um pavimento pode ser realizada de diversas formas, objetivando a percepção da influência de determinadas características em detrimento de outras. Em vista disso, além do monitoramento em campo, em trechos experimentais realizam-se ensaios mecânicos para avaliação do comportamento dos materiais componentes das camadas, visando à possibilidade de análises mecanística-empíricas.

Desse modo, a seguir são apresentados os principais ensaios utilizados para avaliação das misturas asfálticas, dos solos e dos materiais granulares, os quais compõem as camadas dos subtrechos experimentais estudados nesta pesquisa.

2.4.4.1. MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM SOLOS E MATERIAIS GRANULARES

Como aponta Cunto (1998), o ensaio de módulo de resiliência em solos e materiais granulares é fundamental para análises mecanicistas que envolvem a estimativa de tensões e deformações atuantes na estrutura de um pavimento quando da ação do tráfego. Para realização do ensaio, a norma utilizada é a DNIT 134/2018-ME, a qual busca simular as condições físicas e os estados de tensões que estes materiais estarão submetidos no pavimento, determinando o módulo de resiliência (resposta elástica) para diversas combinações de tensões aplicadas com um equipamento triaxial de carga repetida.

Destaca-se que a norma pode ser empregada para amostras de solos (materiais mais finos), de brita graduada, materiais estabilizados granulometricamente, bem como solos e materiais melhorados por pequenas quantidades de adições de produtos químicos ou outros materiais alternativos não estabilizados quimicamente. Isto porque, para materiais estabilizados quimicamente, há uma norma específica, cuja principal diferença é a desconsideração da tensão confinante, uma vez que a estabilização química já confere coesão o suficiente ao material, de forma que a tensão confinante não apresenta diferenças significativas na resposta de comportamento do material.

Dessa forma, por meio do equipamento triaxial de cargas repetidas e com a aplicação da sequência de pares de tensões (confinante e desvio) indicadas na norma, é possível a obtenção do módulo de resiliência (MR) dos materiais, dado pela relação entre a tensão desvio (σ_d) aplicada repetidamente numa amostra de solo ou material granular, e a correspondente deformação vertical resiliente (ε_r), conforme Equação 2.1.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_r} \quad (2.1)$$

Diante das observações supracitadas, percebe-se que é possível a utilização desse ensaio para avaliação do material fresado estabilizado com espuma de asfalto. Contudo, é fundamental a avaliação das adições realizadas na mistura, em termos de quantidade de ligante asfáltico e do

filler utilizado, pois estes são fundamentais para determinar se trata de materiais dependentes ou não da tensão confinante, bem como a necessidade de consideração das propriedades termo viscoelásticas da mistura.

2.4.4.2. DEFORMAÇÃO PERMANENTE EM SOLOS E MATERIAIS GRANULARES

As parcelas de deformações que podem ocorrer em um pavimento, em resposta à solicitação do tráfego, podem ser divididas em duas: resiliente (elástica) e permanente (plástica). Com relação à parcela permanente, Medina e Motta (2005) a definem como o acúmulo de pequenos deslocamentos irreversíveis nas camadas de um pavimento quando submetido às ações do tráfego, gerando um dos principais defeitos em pavimentos: o afundamento de trilha de roda (ATR). A depender das características do material da camada, podem ocorrer significativas deformações no pavimento, sendo importante caracterizá-los, buscando entender a natureza dessas deformações.

Um dos ensaios utilizados para avaliação da deformação permanente está descrito na norma DNIT 179/2018-IE, a qual especifica os procedimentos para determinação da deformação permanente em solos, britas graduadas e materiais não estabilizados quimicamente, buscando submeter tais materiais ao estado de tensões que estão submetidos em campo, por meio da utilização de um equipamento triaxial de carga repetida.

São aplicados diversos ciclos de carga repetida para determinados estados de tensões em nove corpos de prova (podendo-se reduzir para seis em alguns casos), obtendo-se a deformação permanente acumulada ao longo dos ciclos. Logo, com os valores dos deslocamentos plásticos obtidos durante a realização do ensaio, estima-se a deformação específica permanente do material para o estado de tensões utilizado em um determinado corpo de prova, conforme Equação 2.2.

$$\varepsilon_p = \frac{\delta_p}{H_0} \quad (2.2)$$

Onde

δ_p é o deslocamento permanente acumulado;

H_0 é a altura de referência do medidor de deslocamento (LVDT), descontado o deslocamento permanente acumulado corresponde ao número de ciclo anterior, em mm.

A partir dos resultados do ensaio, é possível então definir as tensões do modelo apresentado por Guimarães (2009), indicado na Equação 2.3, que o elaborou a partir da análise de diversos resultados de ensaios de deformação permanente realizados no equipamento triaxial de cargas repetidas, sob vários níveis de tensão, em diversos solos brasileiros.

$$\varepsilon_p^{esp} = \psi_1 \cdot (\sigma_3)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d)^{\psi_3} \cdot (N)^{\psi_4} \quad (2.3)$$

Onde

- ε_p^{esp} deformação permanente específica (%);
- $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ parâmetros de regressão;
- σ_3 tensão confinante (kgf/cm²);
- σ_d tensão desvio (kgf/cm²);
- N número de ciclos de aplicação de carga.

Por fim, tratando-se de deformação permanente, é importante mencionar o comportamento de *shakedown* que o material pode vir a atingir. Este ocorre quando o material apresenta um acomodamento das deformações, cessando a deformações plásticas quando submetido a um carregamento de cargas repetidas e, a partir desse momento, passa a apresentar apenas deformações elásticas (Delgado, 2014).

A norma DNIT 179/2018-IE apresenta os modelos de comportamento à deformação permanente de solos que podem ser gerados quando da análise do *shakedown*, mostrados na Figura 2.7. Em linhas gerais, diz-se que o material entrou em *shakedown*, quando a carga repetida aplicada é suficientemente pequena de modo a não produzir deformações plásticas relevantes, com as deformações sendo totalmente recuperadas.

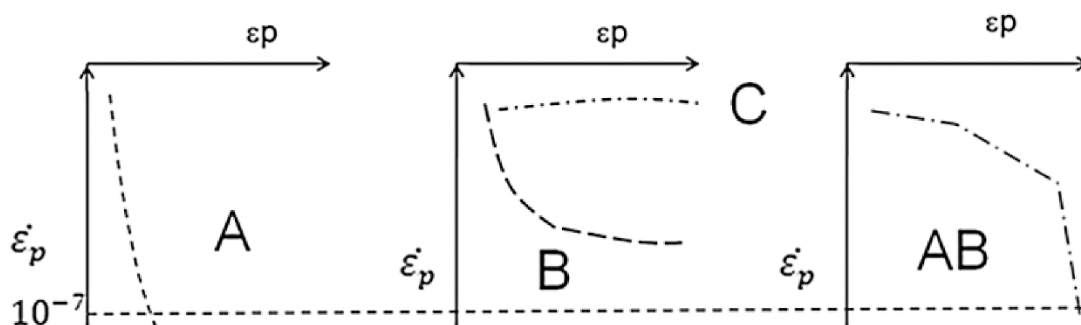


Figura 2-7 – Análise do acomodamento (*shakedown*) (Lima, 2021).

O gráfico indicado em A mostra quando ocorre o acomodamento plástico (*shakedown*), indicando que não haverá problemas de afundamento no pavimento. Em B e C, não ocorre o acomodamento plástico, podendo o material gerar deformações elevadas na estrutura do pavimento. Por fim, o gráfico AB apresenta um acomodamento plástico, mas antes apresenta significativas deformações iniciais do material.

De acordo com Delgado (2014), as curvas geradas pelo gráfico, quando tendem a um paralelismo ao eixo vertical, caracterizam o fenômeno do *shakedown*. Como aponta Guimarães (2009), convencionou-se que a taxa de acréscimo da deformação permanente por ciclo de carga da ordem de 10^{-7} metros por ciclo de aplicação de carga representa o acomodamento plástico.

2.4.4.3. MÓDULO DE RESILIÊNCIA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Por meio do ensaio de módulo de resiliência em misturas asfálticas, busca-se considerar a resposta elástica do pavimento, admitindo a hipótese de que o comportamento das misturas asfálticas seja elástico linear, possibilitando uma análise simplificada do sistema de camadas, seja por meio de soluções analíticas, seja por meio de soluções numéricas.

O ensaio de módulo de resiliência (MR) em misturas asfálticas, preconizado pela norma DNIT 135/2018-ME, tem como objetivo principal a obtenção da relação entre a tensão de tração resultante da carga cíclica e a correspondente deformação de tração resultante do deslocamento horizontal resiliente, por ciclo, geradas no ensaio de compressão diametral. Atualmente, é o ensaio utilizado para avaliar a rigidez das misturas asfálticas no MeDiNa.

Para realização do ensaio, é necessário, inicialmente, realizar ensaios de resistência à tração, de acordo com a norma DNIT 136/2018-ME, para definição da carga do ensaio de MR, a qual deve estar entre 5% e 25 % da média da resistência à tração obtida. Uma vez determinada a carga, e tendo sido realizado o condicionamento para controle da temperatura do corpo de prova, este pode ser devidamente posicionado no equipamento para colocação dos sensores de deslocamento. Realizadas estas etapas, o carregamento cíclico pode ser aplicado, de acordo com as orientações da norma, para obtenção do módulo de resiliência.

No ensaio de módulo de resiliência, considera-se que os deslocamentos obtidos são recuperáveis, também chamados de resilientes. Contudo, mesmo em ensaios conduzidos a baixos níveis de carregamento da tensão de ruptura, ainda ocorrem deslocamentos plásticos, os quais não devem ser contabilizados para fins de determinação do módulo de resiliência.

Para que essa parcela seja desconsiderada, faz-se um desconto dos deslocamentos plásticos lidos por meio das tangentes dos segmentos 1 e 3 da Figura 2.8, as quais passam pelas partes retilíneas do registro deste parâmetro. Portanto, como aponta a norma DNIT 135/2018 – ME, na interseção das duas tangentes é que se mede a parcela elástica a ser empregada para a obtenção do MR.

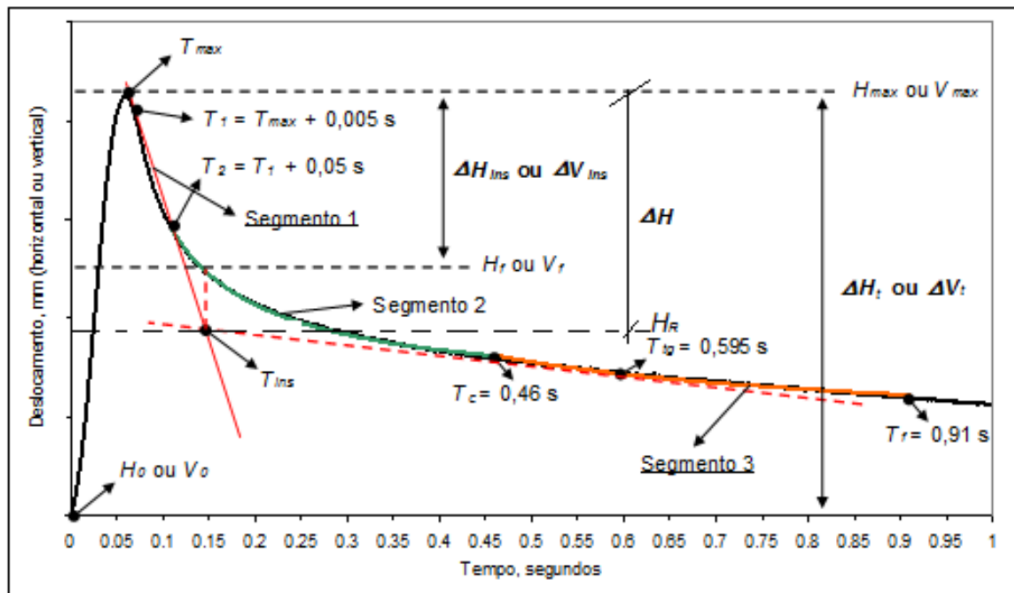


Figura 2-8 – Gráfico do ensaio de Módulo de Resiliência (DNIT 135/2018 – ME).

Uma vez obtido o deslocamento horizontal resiliente, é possível determinar o módulo de resiliência da mistura asfáltica, dado pela Equação 2.4, considerando um corpo de prova de diâmetro de 101,6 mm.

$$MR = \frac{P}{|\Delta H|_t} (0,2692 + 0,9976\mu) \quad (2.4)$$

Onde

MR é o módulo de resiliência, expresso em MPa;

P é a carga cíclica, expressa em N;

ΔH é o deslocamento horizontal resiliente na interseção das duas tangentes, expresso em mm;

t é a altura do corpo de prova, expressa em mm;

μ é o coeficiente de Poisson.

Com os resultados obtidos no ensaio, como aponta Bernucci *et al.*, (2010), é possível relacionar as deformações recuperáveis com as fissuras surgidas nos revestimentos asfálticos, sendo um parâmetro fundamental para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos.

2.4.4.4. FADIGA EM MISTURAS ASFÁLTICAS

O fenômeno de fadiga, como aponta Colpo (2014), é caracterizado por um processo de deterioração estrutural que o pavimento está sujeito quando é submetido a um estado de tensões e deformações repetidas. Com isso, ocorre o aparecimento de trincas no pavimento que, posteriormente, podem levar à sua ruptura, quando atingido uma determinada quantidade de repetições de carregamento.

Assim como o Módulo de Resiliência, é necessário entender o comportamento à fadiga do material asfáltico, pois torna-se possível analisar a mistura, buscando a realização de um dimensionamento adequado, sendo possível a aplicação de análises mecanicistas.

Para estabelecer a relação entre o estado de tensão-deformação e o número de ciclos de carga que ocorrem até o pavimento atingir a ruptura, são utilizados ensaios de laboratório de cargas repetidas, no qual, mediante a aplicação de diferentes níveis de tensão ou deformação, procura-se reproduzir as condições das misturas betuminosas quando o pavimento se encontra em serviço (Fontes, 2009).

No Brasil, com o MeDiNa, o ensaio de fadiga é realizado mais comumente à tensão controlada, sendo especificado pela norma DNIT 183/2018-ME, a qual define a vida de fadiga de uma determinada mistura asfáltica como o volume de tráfego (Número N) que o revestimento pode suportar antes que ocorra dano. Este dano está relacionado a uma determinada porcentagem admissível de trincas para o dimensionamento da rodovia em questão.

No ensaio, são utilizados 15 corpos de prova, sendo 3 deles para determinação da resistência à tração. Nos outros 12, são aplicadas as cargas necessárias em cada conjunto de 3 corpos de prova. Os níveis de tensão a serem adotados são escolhidos entre 5 % e 40 % do valor da carga que resultaria na resistência à tração da amostra. O critério de ruptura empregado na norma considera que, para a definição do número de ciclos correspondente a cada nível de carregamento aplicado, deve-se ocorrer a ruptura completa do corpo de prova.

Dessa forma, definidas as cargas, segue-se à aplicação dos procedimentos descritos na norma, obtendo-se o resultado em termos de vida de fadiga, expressa pelo Número N de solicitações

necessárias para o fim do ensaio. A vida de fadiga pode ser relacionada à tensão de tração geral inicial (σ_t), à deformação de tração inicial (ε_i), à diferença de tensões no centro da amostra ($\Delta\sigma$) ou à relação da tensão aplicada pela resistência à tração estática, conforme Equação 2.5.

$$N_f = k_1 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_t}\right)^{n_1} \quad (2.5)$$

$$N_f = k_2 \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_i}\right)^{n_2}$$

$$N_f = k_3 \cdot \left(\frac{1}{\Delta\sigma}\right)^{n_3}$$

$$N_f = k_4 \cdot \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_r}\right)^{n_4}$$

Onde

N_f vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga para a redução de 50% da rigidez da mistura ou ruptura total do corpo de prova.

k_1, k_2, n_1, n_2 parâmetros determinados experimentalmente.

2.4.4.5. FLOW NUMBER

O ensaio de *Flow Number* é utilizado para avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas. Apresenta-se, junto à deformação permanente causada pelos materiais das camadas inferiores, na forma de afundamento de trilha de roda no revestimento asfáltico, sendo necessária sua avaliação e melhoria das misturas, a fim de evitar tal defeito. Sua ocorrência se dá, de acordo com Júnior *et al.* (2018), em razão da ocorrência conjunta de deformação viscosa do ligante asfáltico e da deformação plástica do agregado pétreo integrante da mistura.

De acordo com Witczak (2002), a deformação pode ser caracterizada em três etapas: (i) a densificação dos materiais devido ao excesso de vazios, causada pela aplicação de cargas verticais no pavimento; (ii) a deformação devido ao efeito do Poisson, pois a densificação vertical provoca tensões laterais que, em razão da baixa resistência ao cisalhamento, podem formar as sobre-elevações laterais e; (iii) a deformação mecânica dos materiais em razão de sua baixa resistência.

Diante deste tipo de defeito, um dos ensaios utilizados para sua avaliação é o *Flow Number*, que é o ensaio triaxial uniaxial de carga repetida. Segundo Júnior (2018), apresenta-se como um bom indicador da deformação permanente em razão da forma de aplicação da carga, que se

assemelha mais ao tráfego em campo, quando comparado à aplicação de carga estática, fazendo uso da aplicação de pulsos de carga ao corpo de prova seguido de um intervalo de repouso.

A norma empregada para sua realização é a DNIT 184/2018 – ME, que mede a deformação plástica uniaxial acumulada ao longo do ensaio através de sensores fixados no corpo de prova. De acordo com o normativo, para obtenção do *Flow Number*, é necessário a confecção de um gráfico das deformações *versus* o número de ciclos realizados durante o ensaio, que resulta em uma curva composta por três estágios: zonas primária, secundária e terciária. Assim, por meio desses pontos, calcula-se o *Flow Number*, o que permite a determinação da taxa de deformação.

A Figura 2.9 apresenta uma curva típica do ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da deformação plástica (permanente) vertical, apresentando o comportamento esperado do material em cada zona.

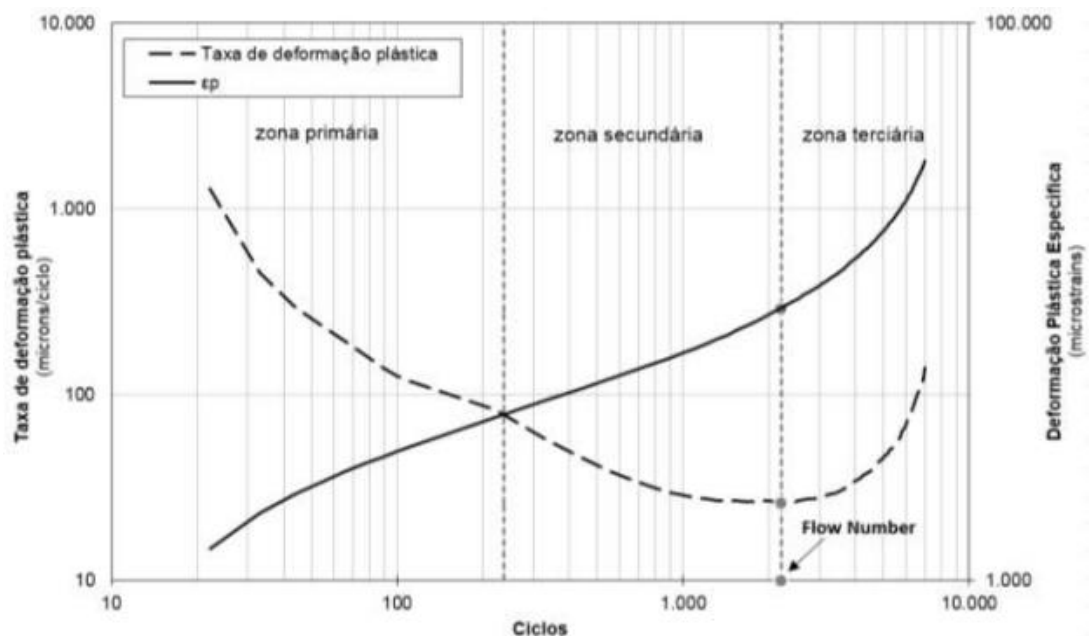


Figura 2-9 – Curva típica do ensaio de *Flow Number* (DNIT 184/2018-ME).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consistiu na implantação de um Trecho Experimental, composto por três subtrechos, na rodovia SP-270, que se encontra sob administração da Concessionária Auto Raposo Tavares (CART). Foram definidas as estruturas para a implantação dos três subtrechos experimentais, em que dois deles tiveram suas espessuras reduzidas visando à aceleração dos danos. Além disso, foi estabelecido um cronograma de monitoramento, visando a avaliação funcional e estrutural do pavimento, e definida uma campanha de ensaios laboratoriais para os materiais constituintes das camadas, buscando avaliar os trechos experimentais sob a ótica do Guia PRO-MeDiNa (Publicação IPR 749), comparando o comportamento campo/laboratório.

Ademais, foram estabelecidos os critérios para a caracterização dos materiais componentes das camadas da estrutura proposta, em especial da mistura reciclada com material fresado estabilizada com espuma de asfalto, que corresponde ao material da camada de base dos três subtrechos.

As etapas para definição e construção do trecho experimental, as técnicas empregadas para a avaliação laboratorial dos materiais e os métodos empregados para o monitoramento em campo, estão descritas nos subitens seguintes.

3.1. DEFINIÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

Para definição da estrutura dos subtrechos experimentais, foi utilizado o projeto de restauração de pavimentos realizado pela empresa COPAVEL, contratada pela CART, que consistiu em diferentes intervenções ao longo da rodovia, uma vez que se tratou de uma solução de restauração de diversos trechos. Para os casos em que era necessária uma reciclagem profunda, a referida empresa dimensionou uma solução com a utilização da base reciclada com espuma de asfalto, apresentando as verificações pertinentes.

A definição da estrutura a ser implementada no pavimento deu-se por meio da análise de tensões e deformações atuantes, comparando-as com as tensões e deformações admissíveis. A verificação mecânica da estrutura do pavimento foi realizada para um tempo de projeto de

10 anos, utilizando o programa *ELSYM-5 Elastic Layered System*, conforme resumo apresentado na Figura 3.1.

N USACE = 8,47E+07
 N AASHTO = 3,86E+07
ESTRUTURA-TIPO ANALISADA

CBIUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente	5,0 cm	E = 37.500 kgf/cm ²	m = 0,30
BSM 1 (C=250, Phi=35)	32,0 cm	E = 6.000 kgf/cm ²	m = 0,35
Sub-base de Solo Arenoso Fino	15,0 cm	E = 2.000 kgf/cm ²	m = 0,35
SUBLEITO	∞	E = 1.160 kgf/cm ²	m = 0,45

ESFORÇOS		
	ATUANTES	LIMITES
D ₀	= 38,0 x 10 ⁻² mm	41,2 x 10 ⁻² mm
ε _(CBIUQ-Fx III)	= 1,25E-04	1,26E-04
SR _{base}	= 0,23	0,23
ε _{v(Subst)}	= -2,43E-04	-2,51E-04

EQUAÇÕES DE FADIGA	
Órgão	Equação
DNER PRO 011/79	log D _{oadm} = 3,01 - 0,176 x log N
ASPHALT INSTITUTE	ε _{adm} = 2,50 ⁻² x N ^(-1/3,281)
DSR M.Sc. Carl Birman	Nf = 10 ^{(A+BRD₀-C(RC)-D(PS)-E(SR))}
SHELL (Domon e Metcalf)	ε _v = -0,0116 x N ^{-0,21}

Figura 3-1 – Solução de projeto original realizada pela COPAVEL.

Como mencionado, em alguns pontos do projeto original, foi prevista uma reciclagem profunda do pavimento, em outros, apenas a fresagem do revestimento asfáltico. Em uma das áreas em que foi proposta a reciclagem profunda, definiu-se um local para a implantação do TE, tendo em vista a estrutura existente no pavimento. Buscou-se um local preferencialmente em tangente, sem a intervenção de obras de arte correntes, como bueiros e galerias, e sem a presença de acessos, interseções ou demais interferências que pudessem afetar a qualidade de levantamento dos dados.

O segmento escolhido está localizado entre o km 407+875 e o km 407+725, pista sentido leste, faixa 2. Apresenta um Número N de projeto, considerando o período de 10 anos, de 8,47x10⁷. A Figura 3.2 apresenta o trecho antes da restauração, onde é possível perceber que se tratava de um segmento já bastante danificado, com altos índices de área trincada e afundamentos de trilha de roda.



Figura 3-2 – Trecho experimental antes da restauração.

Não há informações de quando o trecho foi construído e as manutenções realizadas ao longo do tempo de vida do pavimento. Desse modo, uma vez definida a exata localização de implantação do segmento experimental, fez-se necessário conhecer com clareza o pavimento presente no trecho antes do processo de restauração, a fim de identificar a estrutura de camadas existente.

À época da realização do dimensionamento do projeto, foram realizadas sondagens, espaçadas ao longo da rodovia, para identificação das camadas do pavimento presente. Contudo, tornou-se necessário saber exatamente qual estrutura do trecho definido, uma vez que as camadas e as soluções variaram ao longo da rodovia, não podendo afirmar ao certo qual seria o material remanescente na rodovia após a restauração e construção do trecho experimental.

Em vista disso, antes do início da obra de restauração, em julho de 2021, foram feitos dois poços de sondagem no acostamento da pista do trecho experimental, como mostrado na Figura 3.3. Dessa maneira, foi possível definir os materiais presentes em cada camada, bem como a espessura de cada uma delas, fornecendo, assim, subsídios para definição da correta espessura a ser fresada durante o processo e restauração, e para a identificação mais precisa do material remanescente.



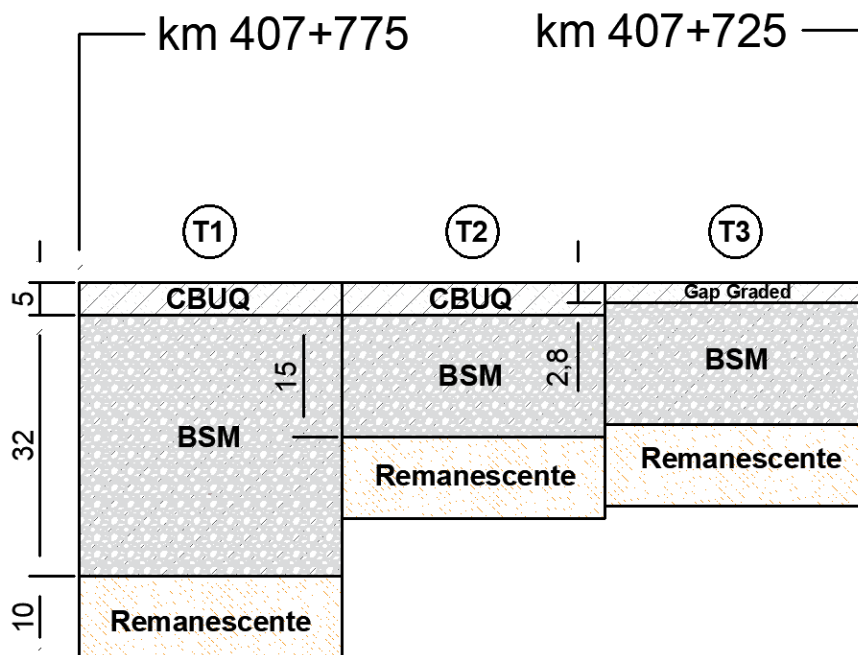
Figura 3-3 – Sondagem Trecho Experimental – julho/2021 (CART)

De acordo com ambas as sondagens, o local apresenta revestimento asfáltico de 11 a 12 cm de CBUQ, uma base/sub-base de 19 a 20 cm de solo melhorado com cimento e um subleito de argila arenosa vermelha, indicando que não há presença de material saturado em nenhuma camada. A camada de sub-base foi identificada como de solo melhorado com cimento em razão da presença de grumos ao se coletar a amostra, formando-se algumas “pedras” mais rígidas no solo.

Conhecidas as camadas presentes no pavimento, foi possível definir a nova estrutura do trecho experimental. O projeto original previa a fresagem do pavimento existente e a construção de uma camada de base com material estabilizado com espuma de asfalto, de 32 cm, seguida de uma camada de revestimento asfáltico, de 5 cm.

Dessa forma, tendo como referência esse projeto, foram definidas três diferentes soluções para os subtrechos experimentais, denominados T1, T2 e T3, onde cada um deles contou com 50 m de extensão. Nos trechos T1 e T2 foi empregada a mesma solução de materiais do projeto original: revestimento asfáltico com ligante modificado por polímero e base reciclada com material fresado estabilizada com espuma de asfalto. Entretanto, no trecho T2, a espessura da base foi reduzida visando à aceleração dos danos no pavimento resultantes dos agentes externos (tráfego e clima).

Já no trecho T3, além da redução de espessura da base, foi empregado como revestimento asfáltico uma esbelta camada de gap-graded, com o mesmo ligante modificado por polímero dos demais trechos. Portanto, o trecho T1 foi implantado da mesma forma como sugerido no projeto original, enquanto os demais trechos sofreram modificações, conforme apresentado na Figura 3.4.



BSM: Material estabilizado com betume (espuma de asfalto com fresado) - CAP 50 / 70 - Betunel
CBUQ com CAP 60/85 Stylink - Betunel

Figura 3-4 – Soluções dos Trechos Experimentais.

No que se refere às dosagens e composições dos materiais componentes das camadas, também foram utilizadas as misturas e materiais definidos pela COPAVEL. Conforme estudo apresentado pela empresa, para a execução do projeto de dosagem na base de espuma de asfalto, foram utilizadas amostras de material fresado, coletadas no depósito da CART, junto ao ligante

asfáltico CAP 50/70 fornecido pela empresa Betunel. Foi utilizada uma usina em escala de laboratório (WLB 10 da Wirtgen), a qual permite a mistura dos agregados com a espuma para confecção dos corpos de prova para posterior avaliação dos ensaios de laboratório, no tocante aos ensaios necessários para o dimensionamento proposto pelo Manual TG2 2020. A curva granulométrica empregada na mistura estabilizada com espuma de asfalto é apresentada na Figura 3.5. Destaca-se, ainda, que o tempo de meia-vida obtido para a espuma foi de 10,3 segundos, e a taxa de expansão foi de 15,9 vezes.

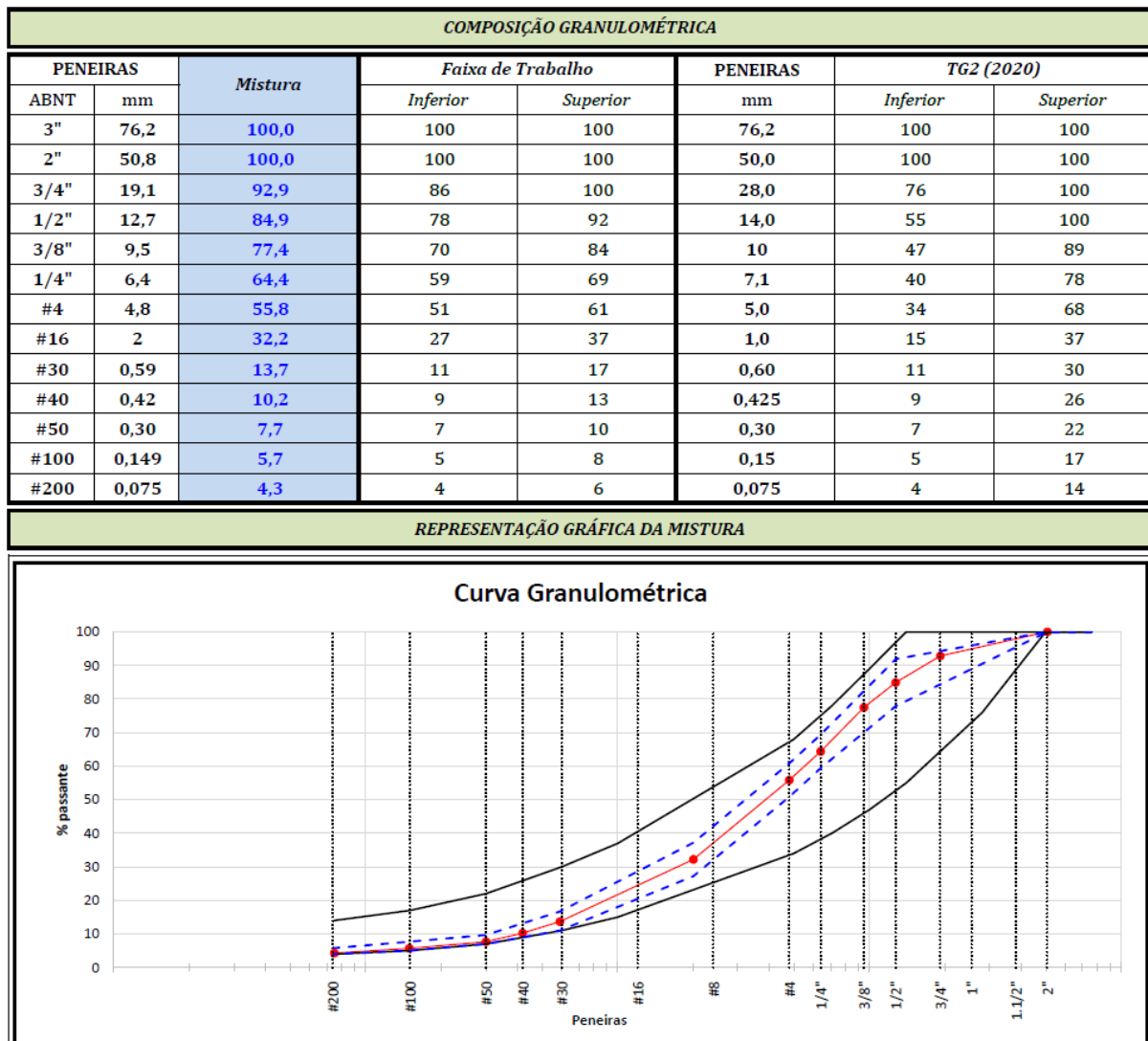


Figura 3-5 – Curva granulométrica da mistura reciclada com espuma de asfalto.

Por sua vez, no que concerne ao projeto de dosagem do revestimento asfáltico, tratando-se especificamente da mistura de CBUQ e de gap-graded, as dosagens foram executadas pela construtora KAPA Pavimentação, contratada pela CART, empregando, em ambos os casos, ligante asfáltico com polímero Stylink 60/85, da Betunel, e agregados britados coletados próximos à região. As composições do revestimento com CBUQ e gap-graded, bem como da

base reciclada estabilizada com espuma de asfalto são apresentadas nas Tabela 3.1, Tabela 3.2 e Tabela 3.3, respectivamente.

Tabela 3-1 – Composição da mistura com CBUQ.

Material	Seca	Composição
Brita 1/2	15,0%	14,3
Pedrisco	39,0%	37,1
Pó de Pedra	45,0%	42,8
Cal - CH 1	1,0%	1,0
CAP 60/85	-	5,0

Tabela 3-2 – Composição da mistura com gap-graded.

Material	Seca	Composição
Pedrisco	66,5%	63,2
Pó de Pedra	32,0%	30,4
Cal - CH 1	1,5%	1,4
CAP 60/85	-	5,0

Tabela 3-3 – Composição da mistura com espuma de asfalto.

Material	Unidade	Valor Definido
Material Fresado <i>In natura</i>	% em massa	83
Pó de pedra	% em massa	17
<i>Filler</i> ativo - Cal	% em massa	1,0
CAP 50/70 Betunel	% em massa	2,4
Teor de Umidade Ótimo para compactação	%	5,5
Teor de água para espumação	%	2,2

3.2. CONSTRUÇÃO DO TRECHO EXPERIMENTAL

Conhecidos todos os materiais e a estrutura de camadas do pavimento, a construção do trecho experimental ocorreu no dia 21/10/2021, ocasião em que foi realizada a fresagem do pavimento existente e a recomposição da estrutura, conforme soluções já apresentadas na Figura 3.4.

Antes da construção dos trechos experimentais, o acompanhamento e a produção dos materiais constituintes dos pavimentos foram realizados. Com relação à produção da mistura dos dois tipos de revestimento asfáltico, esta foi realizada em uma usina da KAPA Engenharia e levada à campo no momento de sua aplicação. Já no que diz respeito à produção do material da base estabilizada com espuma de asfalto, pôde-se acompanhar o processo de produção, o qual ocorreu em uma usina móvel instalada nas proximidades do trecho. Além disso, nos dias 18 e 19 de outubro de 2021, já haviam sido realizados testes com a espuma de asfalto, a fim de calibrar o procedimento para que a dosagem pudesse ser adequadamente reproduzida em campo na ocasião da construção do trecho.

Para a produção da mistura estabilizada com espuma de asfalto, o processo ocorreu de forma semelhante ao da produção das misturas asfálticas. Em um determinado ponto da usina, deu-se a entrada do material fresado, cal e pó de pedra, os quais compuseram a granulometria da mistura. Em outro ponto, ocorreu a entrada de ligante. Após a injeção de água e ar no ligante, este foi transformado na espuma de asfalto, sendo, dessa forma, misturado ao restante da composição, conforme as quantidades determinadas no projeto de dosagem. Após esse processo, obteve-se a mistura final, como mostrado na Figura 3.6. Todos estes processos foram monitorados por um painel de controle na cabine de comando da usina.



Figura 3-6 – Material Espumado.

Uma vez realizada a produção das misturas necessárias, seguiu-se à construção de todos os subtrechos experimentais. Na oportunidade, foi realizada a fresagem do pavimento existente, sendo feita, inicialmente, apenas a fresagem do revestimento asfáltico, para posterior reaproveitamento do material fresado. Em seguida, realizou-se a fresagem do material remanescente do pavimento, o qual era composto pelo solo das camadas de base e sub-base. Este não foi reaproveitado em nenhuma etapa posterior à construção do trecho.

Concluída a fresagem, procedeu-se à execução da camada de base. No primeiro trecho, por contar com uma espessura maior, de 32 cm, a execução da nova camada foi realizada em duas etapas, a primeira camada foi executada com a espessura de 17 cm e, na sequência, a outra com 15 cm. Nos trechos T2 e T3, a camada foi executada de uma única vez, com 15 cm. Após o espalhamento do material na pista, este foi compactado, na energia modificada, com o emprego

de rolos compactadores pé de carneiro, rolos lisos e, por fim, rolos pneumáticos, nesta sequência. Em seguida, foi realizada a pintura de ligação com emulsão asfáltica.

Realizada a compactação dos três subtrechos e a pintura de ligação, foi aplicado o revestimento asfáltico em CBUQ, na espessura de 5 cm, nos trechos T1 e T2. No trecho T3, aplicou-se o revestimento de gap-graded, com espessura final de 2,8 cm, sendo a mistura produzida com o mesmo ligante dos demais trechos. Na sequência, foi realizado o processo de compactação com rolos liso e pneumático. Feito isso, o trecho foi concluído no mesmo dia. As etapas de construção dos segmentos são mostradas na Figura 3.7.

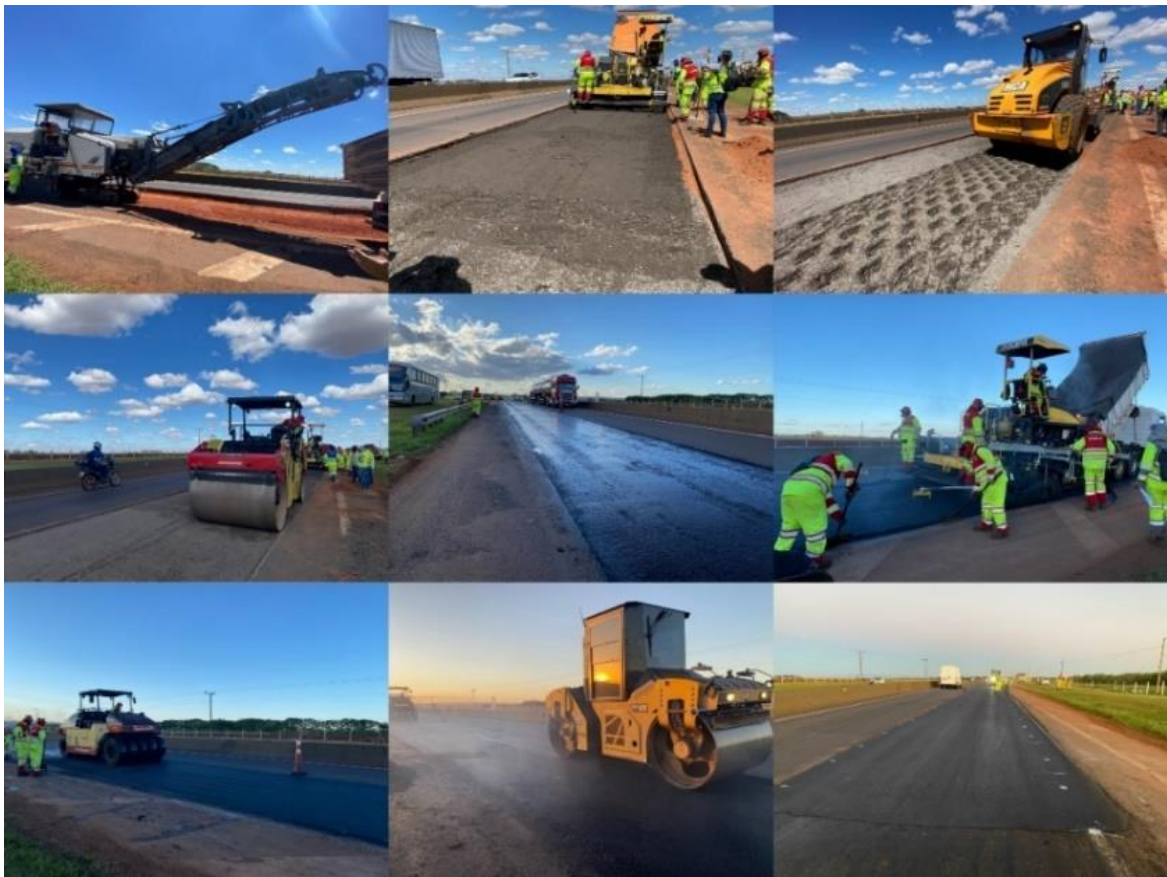


Figura 3-7 – Execução dos Subtrechos T1, T2 e T3.

3.3. SONDAGENS E COLETA DE MATERIAIS

Durante a construção dos trechos, foi realizada a coleta dos materiais integrantes das camadas. No entanto, as amostras se perderam antes da realização dos ensaios. Em razão disso, novas coletas foram realizadas.

Para o subleito, seis meses após a construção do trecho, foi aberto outro poço de sondagem no bordo do trecho T1, realizando-se a coleta de amostra suficiente para realização dos ensaios.

Para a mistura estabilizada com espuma, foi realizada nova coleta em usina, mas exatamente com o mesmo traço previsto no projeto e utilizado no trecho. Por fim, para o revestimento, foi feita a coleta dos agregados e do ligante para a reprodução da mistura em laboratório.

Assim, a partir da coleta de material, foi possível realizar os ensaios necessários para avaliação do material, que também serviram para a composição do banco de dados necessário.

3.4. GEOGAUGE

Com o intuito de complementar a análise de sondagem, visando à caracterização do material, no momento da reciclagem do pavimento foi realizada a medição do módulo de rigidez *in situ* do material com o equipamento Geogauge, conforme Figura 3.8. O equipamento é capaz de controlar, em campo, parâmetros de deformabilidade utilizados para o dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos (Maia *et al.*, 2019).



Figura 3-8 – Leitura com Geogauge.

As leituras com o equipamento foram realizadas na camada do material remanescente após a fresagem do pavimento antigo. De acordo com Von Quintus (2009), recomenda-se o uso de Geogauge para o controle de qualidade das camadas granulares do pavimento, pois apresenta benefícios, tal como fornecer uma medida imediata do módulo do material *in situ*.

Foram realizadas medições tanto na camada mais profunda após a fresagem de 37 cm, o que corresponde a espessura total para construção do trecho T1, bem como a medição do trecho onde foram fresados apenas 19 cm, que corresponde a espessura total de fresagem necessária para a construção do trecho T2.

Dessa forma, por meio das medições realizadas, pôde-se entender melhor o material remanescente da camada, a fim subsidiar de uma melhor maneira as definições do sistema de camadas do pavimento quando da análise mecanística-empírica de verificação.

3.5. MONITORAMENTO

Para a avaliação dos trechos experimentais, uma das etapas mais importantes consiste no seu monitoramento pós-execução, por meio de avaliações das condições funcional e estrutural, envolvendo medições sistemáticas dos defeitos da superfície, principalmente trincamento, afundamento de trilha de roda e bacias de deflexão. Soma-se a isso a realização de ensaios de laboratório, visando à obtenção de parâmetros de rigidez e deformabilidade, com vistas ao entendimento do seu comportamento frente às ações de tráfego e clima, buscando comparar tais resultados com o monitoramento realizado em campo, de acordo com preceitos de análises mecanística-empíricas de pavimentos flexíveis.

Em vista disso, nos tópicos seguintes, é apresentada a metodologia deste trabalho, no que se refere aos métodos empregados para execução dos levantamentos de campo pós-execução e aos ensaios realizados em laboratório.

3.5.1. LEVANTAMENTOS DE CAMPO

Buscou-se monitorar o pavimento após sua construção, avaliando a evolução desses defeitos na superfície de acordo com as ferramentas disponíveis na concessionária. No que possível, as recomendações seguidas foram aquelas descritas no Guia PRO-MeDiNa, do DNIT.

Inicialmente, a fim de observar o comportamento peculiar da base de espuma de asfalto, no tocante à consolidação do material com o passar do tempo e, por consequência, a possibilidade do aumento de rigidez da camada, definiu-se um planejamento de leituras para o monitoramento das deflexões dos trechos experimentais com a Viga Benkelman, prevendo o levantamento de toda a bacia de deflexão.

No primeiro mês, as leituras foram realizadas em um intervalo aproximado de dez dias. A partir do segundo mês, foram realizadas mensalmente. Após o período de um ano, as leituras estão programadas para serem feitas semestralmente, apenas para acompanhamento do comportamento do trecho a longo prazo, não fazendo parte, contudo, dos resultados apresentados nesta pesquisa. Para a Viga Benkelman, foi levantada a bacia em cada estaca, definida de 10 em 10 metros, em todos os subtrechos experimentais.

Outro aspecto sobre esse tipo de pavimento refere-se ao afundamento de trilha de roda, que é previsto devido às propriedades da base em espuma de asfalto, que sofre um processo de consolidação sob a ação tráfego. À vista disso, nas campanhas para medição das deflexões, foram também realizadas medidas do ATR, em todas as estacas (de 10m em 10m), utilizando a treliça de alumínio, conforme norma DNIT 433/2021 – PRO.

Não se espera trincamento prematuro dos trechos no período de avaliação proposto nessa dissertação, mas é importante sua observação sempre quando forem medidas as deflexões e afundamentos. Logo, na ocorrência de trincamento ou qualquer outro tipo de defeito, foi prevista a medição da respectiva área, com a indicação da localização, seguindo os procedimentos da norma DNIT 433/2021 – PRO.

Como já mencionado, as leituras deflectométricas foram realizadas com a Viga Benkelman (VB). Contudo, em fevereiro de 2022, também foi feita uma campanha com o equipamento FWD, da marca KUAB, no trecho experimental em estudo. Na ocasião, foi solicitada a determinação da bacia de deflexão em todas as estacas, de 10 m em 10 m, o que permitiu definir uma correlação entre VB e FWD, uma vez que ambos os levantamentos foram executados sequencialmente para garantir as mesmas condições de contorno *in situ*.

Entende-se que a obtenção de uma correlação entre os equipamentos utilizados não é o ideal, contudo, diante das possibilidades e restrições inerentes ao acompanhamento do trecho, optou-se por esta metodologia. Assim, os parâmetros obtidos puderam fornecer dados para a execução de retroanálises com a utilização do BackMeDiNa.

Isto posto, tendo em vista o monitoramento das condições estrutural e de superfície do pavimento, a Tabela 3.4 apresenta as datas em que foram realizados os levantamentos de Área Trincada (AT), Afundamento de Trilha de Rodas (ATR), levantamento de bacia de deflexão com a Viga Benkelman (VB) e com o FWD. Destaca-se que, inicialmente, os levantamentos de ATR não foram executados porque o trecho não apresentou tal defeito, assim como o levantamento de AT.

Tabela 3-4 – Cronograma de execução dos levantamentos.

Data	Tipo de Levantamento
21-out-21	VB
4-nov-21	VB
11-nov-21	VB
23-nov-21	VB
17-dez-21	VB/ATR/AT
18-jan-22	VB/ATR/AT
22-fev-22	VB/ATR/AT/FWD
5-abr-22	VB/ATR/AT
30-mai-22	VB/ATR/AT

Ademais, a fim de complementar as análises, foram coletados os dados de chuva da região, visto que se trata de um parâmetro que influencia de forma significativa na interpretação dos dados, principalmente no que se refere às medidas deflectométricas.

No mais, durante o período de avaliação do trecho experimental, foram realizados registros fotográficos para o acompanhamento de quaisquer defeitos e anormalidades que pudessem acontecer no segmento.

3.5.2. CORREÇÃO DAS LEITURAS DEFLETOMÉTRICAS

As correções das deflexões, em função da temperatura e da carga, são fundamentais para fins comparativos de diferentes estruturas em razão das condições climáticas aos quais estão submetidas. Ademais, um pavimento é composto por um sistema de camadas de materiais distintos, em que cada camada possui propriedades variáveis, as quais podem ser influenciadas por diversos fatores.

Entre esses fatores, inclui-se a temperatura, capaz de afetar principalmente os revestimentos asfálticos, que podem ter respostas distintas às cargas de tráfego para diferentes temperaturas dos pavimentos. O aumento da temperatura de um pavimento causa um aumento das deflexões medidas, enquanto em temperaturas mais amenas, as deflexões são menores.

Com relação à carga, esta é aplicada através de uma energia potencial que gera impacto na superfície do pavimento, havendo também a necessidade de corrigir para uma carga padronizada. De acordo com Bueno (2016), em equipamentos, principalmente da marca KUAB (o qual foi empregado nos trechos experimentais), a rigidez dos amortecedores na compressão causada pelo conjunto de pesos em queda poderá ser afetada pela realização de ensaios em climas quentes, indicando uma probabilidade de variação no carregamento, sendo importante a

normalização das deflexões para uma carga padrão de referência. Em vista disso, para as leituras deflectométricas realizadas com o FWD, foram realizadas correções de temperatura e de carga. Para a temperatura, o DER/SP (2006) apresenta um ábaco, indicado na Figura 3.9, que tem como objetivo uniformizar as leituras de deflexão para uma temperatura de referência de 25°C, por meio de um fator de ajuste (Vieira, 2020).

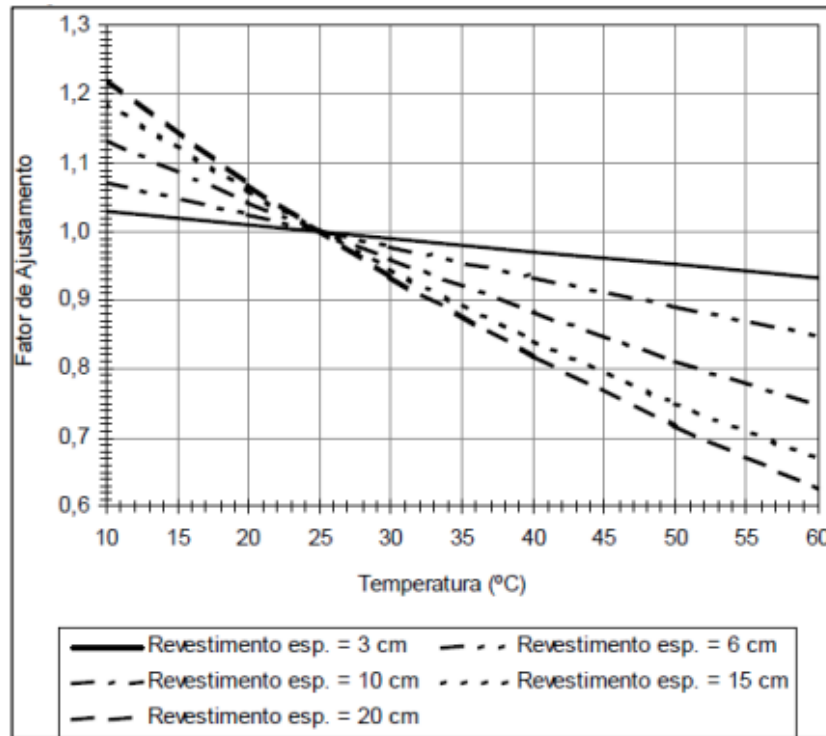


Figura 3-9 – Correção das deflexões em função da temperatura. DER/SP (2006).

O ábaco da Figura 3.9 pode ser expresso por meio da Equação 3.1, que fornece, com base na espessura do revestimento, na temperatura e nas deflexões originais, as deflexões corrigidas.

$$D_t = \frac{D_c}{\frac{E_{rev}}{1000} * (T_{pav} - 25) + 1} \quad (3.1)$$

Onde

D_c é a deflexão medida em campo (corrigida pela carga) ($\times 10^{-2}$ mm);

D_t é a deflexão corrigida pela temperatura de 25°C;

E_{rev} é a espessura da camada de revestimento (cm);

T_{pav} é a temperatura do pavimento (°C).

No que se refere à correção da carga, esta foi feita apenas ajustando-se para a carga de referência de 4100 kgf, que é o valor padrão de aplicação do prato de carga. Assim, a correção se deu por meio da Equação 3.2.

$$D_c = D_o \cdot \frac{4100}{C_{FWD}} \quad (3.2)$$

Onde

D_c é a deflexão corrigida pela carga ($\times 10^{-2}$ mm);

D_o é a deflexão medida em campo ($\times 10^{-2}$ mm);

C_{FWD} é a carga do prato aplicada pelo FWD (kgf).

Por fim, ainda foi necessária a realização da correção dos dados de um geofone do FWD, pois este forneceu valores incoerentes com as demais leituras, indicando um provável problema correspondente à medida de 20 cm de distância do prato de aplicação da carga.

À vista disso, para o tratamento adequado das informações, foi aplicada a correção pela curva de Agnesi, apresentada na Equação 3.3, a qual é capaz de fornecer, a partir das medidas restantes da bacia, uma medida em um ponto de aplicação desejado, conforme estudo realizado de forma semelhante por Andrade (2017).

$$D_i = \frac{D_0}{1 + 10^a \times d_i^b} \quad (3.3)$$

Onde

D_i é a deflexão calculada na distância i ($\times 10^{-2}$ mm);

D_0 é a deflexão máxima ($\times 10^{-2}$ mm);

d_i é a distância i do ponto de aplicação da carga (cm);

a e b são os coeficientes de regressão.

Os parâmetros “a” e “b” são obtidos por meio de uma regressão logarítmica da bacia de deflexão de cada ponto analisado, sendo “a” o intercepto e “b” o coeficiente angular da regressão. Esta correção foi realizada após a correção de temperatura. Logo, após a obtenção do logaritmo dos dados, foram obtidos os parâmetros a e b, aplicando-os, posteriormente, à Equação 3.3.

3.6. ENSAIOS LABORATORIAIS

Para uma completa avaliação do trecho experimental, além do monitoramento das condições estrutural e de superfície do pavimento, também se faz necessária a análise das propriedades dos materiais. Por meio dessa análise, é possível obter sua previsão de danos em programas de dimensionamento mecanístico-empíricos, a princípio o MeDiNa, e compará-la ao observado em campo. Além disso, permite uma análise mais aprofundada do comportamento do material integrante da estrutura do pavimento.

À vista disso, na sequência, é apresentado o programa de ensaios empregado para avaliação laboratorial dos materiais.

3.6.1. ENSAIOS DOS MATERIAIS DAS CAMADAS

Foram realizados ensaios nos materiais componentes de todas as camadas do pavimento, nos três subtrechos experimentais. Devido ao fato de todos os trechos possuírem o revestimento constituído por material asfáltico, os ensaios nas misturas foram os mesmos. Logo, para avaliação da rigidez das misturas e obtenção do módulo de resiliência, empregou-se a norma DNIT 135/2018-ME, com o equipamento de compressão diametral de carga repetida.

Além deste parâmetro, é de suma importância a avaliação de fadiga, que está associada ao dano potencial de área trincada, assim como o ensaio de *Flow Number*, para avaliação da deformação permanente causada na mistura asfáltica, com o ensaio uniaxial de carga repetida. Entretanto, apenas o ensaio de módulo de resiliência foi feito no período desta pesquisa, não havendo tempo hábil para finalização dos demais ensaios, os quais serão incorporados em análises apresentadas em artigo ou outro meio de publicação quando forem finalizados.

Como apresentado na revisão bibliográfica, para a base de espuma, há algumas peculiaridades, por se tratar de um material estabilizado com ligante, além de ser uma mistura ainda pouco difundida no país. Os ensaios realizados para a avaliação do material são usualmente os triaxiais estáticos e a resistência à tração indireta. No entanto, este trabalho propôs a avaliação por meio dos ensaios solicitados por métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos, no caso da presente pesquisa, o MeDiNa.

Como também pôde ser visto, a depender da composição da mistura estabilizada com espuma de asfalto, pode-se obter diferentes comportamentos. Para este trabalho, em muitos aspectos, foram seguidos os procedimentos adotados por Guatimosim (2015), uma vez que a composição

da mistura avaliada pelo autor se assemelha à mistura adotada nesta pesquisa. Além disso, as bibliografias anteriormente citadas serviram de embasamento para o entendimento do comportamento do material.

Foi mencionado que a depender dos teores, a mistura pode possuir um comportamento semelhante ao de um material granular ou a de um material cimentado. Pode ainda, caso tenha um alto teor de ligante, possuir comportamento próximo ao de misturas asfálticas. Como a mistura estudada neste trabalho apresenta 1% de cal e baixo teor de ligante, enquadrando-se perfeitamente nos aspectos exigidos para uma BSM, pôde-se considerá-la como de comportamento semelhante a um material granular. Logo, espera-se que seja mais dependente da tensão confinante e pouco dependente da temperatura e da frequência de carregamento quando comparada a uma mistura asfáltica, ainda que tenha ligante em sua composição.

Dessa forma, a avaliação mecânica da mistura estabilizada deu-se, principalmente, por meio da realização de ensaios triaxiais para obtenção do módulo de resiliência e da deformação permanente, como indicados no MeDiNa para solos granulares.

Por sua vez, para a mistura estabilizada, a definição do ensaio mais adequado não é suficiente para a avaliação do material, pois carece também de considerações a respeito do tempo de cura. No que diz respeito ao período de cura ideal para estes ensaios, os estudos de Bessa *et al.* (2016), ainda que para materiais estabilizados com emulsão, mostraram que não há consenso para os procedimentos aplicados no mundo.

Guatimosim (2015) também não conseguiu perceber uma influência clara da cura no comportamento à rigidez da mistura estabilizada com espuma asfalto quando feitos ensaios de módulo de resiliência, mas observou que os resultados são distintos a depender da consideração.

Após análises preliminares da mistura, percebe-se que a cura à 25°C, elaborada inicialmente por Guatimosim (2015), poderia não representar a potencialidade da mistura em campo, visto que não haveria praticamente nenhum ganho de rigidez no material. Porém, como já visto, Jenkins *et al.* (2007) e outros autores supracitados, em seus estudos, conseguiram provar o ganho de rigidez da camada a longo prazo.

Portanto, tendo como referência os estudos apresentados e as considerações feitas por diversos autores (apresentada na Tabela 2.1), optou-se pela cura seca, no período de 7 dias, em razão da disponibilidade de tempo e pelos estudos mostrarem se tratar de um tempo razoável, no que se refere à cura seca.

Já com relação à temperatura, Bessa *et al.* (2016) apresentou bons resultados para temperaturas de 40 °C e 60 °C, tendo definido esta última em seus estudos por apresentar maior rigidez, quando comparada à de 40 °C. Fu *et al.* (2010) considerou, no caso da cura seca, a temperatura ideal como a de 40 °C com 7 dias de cura. Soma-se a isso a norma DNIT 169/2014-ES que trata do processo de execução de camadas de base com mistura recicladas a frio com adição de espuma de asfalto. No que tange à etapa de controle de execução, recomenda a moldagem, em laboratório, de corpos de prova Marshall, na energia modificada, após 72 horas (3 dias) de cura em estufa à 40 °C.

Diante das observações realizadas, no presente estudo, optou-se pela temperatura de 40 °C para a cura. Em primeiro lugar, essa escolha se deu em razão do ponto de amolecimento do ligante asfáltico (CAP 50/70) da mistura que é de, aproximadamente, 46 °C (CBB Asfaltos). Visando não correr o risco de associar algum dano ao ligante, optou-se por uma temperatura menor que este limite.

Além disso, o trecho ainda se encontra em processo de consolidação. Logo, ao tempo de análise que se propõe esta dissertação, espera-se que a mistura estabilizada com espuma de asfalto não se encontre no pico de rigidez.

Portanto, entende-se que, neste momento, a cura seca realizada na temperatura de 40 °C representaria o material melhor forma, o que vai ao encontro da especificação DNIT 169/2014-ES. Este método de cura foi o utilizado como padrão tanto para os ensaios triaxiais de módulo de resiliência, quanto de deformação permanente, cujos procedimentos do ensaio foram seguidos conforme as normas DNIT 134/2018-ME e DNIT 179/2018-IE, respectivamente, destinadas a materiais granulares e solos.

Para a avaliação do comportamento mecânico do material, foi empregado o triaxial de cargas repetidas, de acordo com as normas supracitadas. Os corpos de prova utilizados para os ensaios foram cilíndricos, de 200 x 100 mm, compactados no molde tripartido, na energia modificada exigida para solos, com 21 golpes por camada, sendo um total de 10 camadas compactadas. Antes, durante e após a realização dos ensaios, foi verificado o teor de umidade das amostras ensaiadas.

Para o ensaio de módulo de resiliência padrão, com cura na temperatura de 40° C durante 7 dias, foram empregados três corpos de prova, com a aplicação da sequência dos 18 pares de tensão, indicados na Tabela 3.5, para obtenção das leituras das deformações resilientes. Dessa

forma, foi possível determinar o módulo de resiliência para cada par de tensão, bem como a média de todos eles.

Tabela 3-5 – Sequência de tensões para determinação do MR (DNIT 134/2018-ME).

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1/σ_3
20	20	2
	40	3
	60	4
35	35	2
	70	3
	105	4
50	50	2
	100	3
	150	4
70	70	2
	140	3
	210	4
105	105	2
	210	3
	315	4
140	140	2
	280	3
	420	4

Por sua vez, no ensaio de deformação permanente, foram empregados 9 corpos de prova, com a aplicação de 150.000 ciclos para cada par de tensão indicado na Tabela 3.6. Por meio dessa quantidade de corpos de prova, foi possível determinar o modelo de comportamento à deformação permanente proposto por Guimarães (2009), tal como recomendado pelo normativo empregado para realização do ensaio.

Tabela 3-6 – Estado de tensão utilizado para determinação da deformação permanente da mistura estabilizada com espuma de asfalto (DNIT 179/2018-IE).

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1/σ_3
40	40	2
	80	3
	120	4
80	80	2
	160	3
	240	4
120	120	2
	240	3
	360	4

Além disso, os mesmos ensaios descritos para a mistura estabilizada com espuma de asfalto também foram feitos no subleito, correspondente ao material remanescente após a fresagem do

pavimento pré-existente. Entretanto, para o ensaio de deformação permanente, a norma DNIT 179/2018-IE permite um número mínimo de 6 corpos de prova para o material, desde que os valores das tensões sejam bem espaçados entre si, de modo a abranger um universo amplo de tensões atuante no material em relação à carga de roda do eixo padrão. Em vista disso, as tensões desvio intermediárias para cada tensão confinante exigida da norma foram desconsideradas, restando os seis pares de tensão indicados na Tabela 3.7.

Tabela 3-7 – Estado de tensão utilizado para determinação da deformação permanente para o material do subleito (DNIT 179/2018-IE)

σ_3 (kPa)	σ_d (kPa)	σ_1/σ_3
40	40	2
	120	4
80	80	2
	240	4
120	120	2
	360	4

Além dos ensaios mecânicos descritos, também se realizou a caracterização completa do material do subleito. Foi realizada a análise granulométrica, de acordo com a norma DNER-ME 080/94, os limites de liquidez e plasticidade, de acordo com as normas DNER-ME 122/94 e DNER-ME 082/94, o Índice Suporte Califórnia (ISC) e a expansão, com a norma DNER-ME 049/94 (energia normal), e os ensaios da metodologia MCT, de acordo com as normas DNER-ME 258-94 e DNER-ME 256/94.

Dessa forma, diante das considerações apresentadas, a Tabela 3.8 mostra um resumo dos principais ensaios realizados na camada de base estabilizada com espuma de asfalto, nas camadas de revestimento asfáltico e no material remanescente após a fresagem, ou seja, o subleito. Estes ensaios serviram para entender o comportamento mecânico do material, de forma a associá-lo ao comportamento observado em campo.

Tabela 3-8 – Ensaio laboratoriais realizados.

Camada	Material	Ensaio
Revestimento	Concreto Asfáltico (CBUQ)	Módulo de Resiliência
Base	Mistura estabilizada com espuma de asfalto	Módulo de Resiliência Deformação Permanente Ensaio de Caracterização (dosagem)
Subleito	Argila arenosa	Módulo de Resiliência Deformação Permanente Ensaio de Caracterização

3.6.2. EFEITO DA CURA NA MISTURA ESTABILIZADA COM ESPUMA ASFALTO

Durante a execução dos ensaios, percebeu-se a necessidade de melhor avaliar o efeito da cura da mistura estabilizada com espuma de asfalto, e como ela influencia na rigidez do material. Em razão disso, foram também avaliados outros tempos de cura, por meio do ensaio triaxial de módulo de resiliência, sendo definidas as temperaturas e a quantidade de dias em cada caso, conforme indicado na Tabela 3.9. Estas definições foram baseadas nos estudos apresentados na revisão bibliográfica deste trabalho, as quais foram resumidas anteriormente na Tabela 2.1.

Tabela 3-9 – Avaliação do MR em diferentes condições de cura.

Código	Temperatura (C°)	Dias	Qt. CPs
T40D7	40	7	3
T40D3	40	3	3
T25D7	25	7	3
T25D0	25	0	2

Cada ensaio foi codificado pela temperatura do ensaio e pela quantidade de dias considerada para a cura. Por exemplo, para a amostra com código “T40D7”, foi empregada a temperatura de 40°C, considerando um período de cura de 7 dias.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT 134/2018-ME, empregada para solos granulares, de acordo com os pares de tensão já indicados na Tabela 3.6. As considerações para a preparação do corpo de prova da mistura estabilizada e a realização dos ensaios foi a mesma adotada para o procedimento padrão, de 40°C durante 7 dias.

Portanto, para cada condição, foi realizado o ensaio de MR em 3 corpos de prova, conforme exigência da norma, com exceção da condição T25D0, onde foi possível realizar o ensaio com apenas 2 corpos de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados da pesquisa. Inicialmente, são exibidas as análises e as discussões referentes aos ensaios laboratoriais dos materiais componentes das camadas e, na sequência, os resultados dos levantamentos de campo realizados, bem como as retroanálises com o BackMeDiNa. Por fim, apresenta-se uma análise com o MeDiNa, comparando-se o resultado campo/laboratório.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Para entender o comportamento do pavimento, é essencial conhecer as características dos materiais que compõem sua estrutura. Tendo isto em vista, o primeiro ponto a ser avaliado, o qual embasou decisões técnicas a respeito das camadas dos pavimentos, foi o resultado com o equipamento Geogauge. As análises com o equipamento permitiram avaliar que todo o material remanescente, após a fresagem do revestimento e da base, de forma geral, comporta-se, atualmente, como um material de características semelhantes. Para o solo da sub-base remanescente, foram encontrados valores de módulo de rigidez da ordem de 266 MPa, enquanto para o subleito, valores em torno de 205 MPa.

Percebe-se, por meio dessa análise, que o comportamento da camada de sub-base, que possui uma quantidade de cimento apenas para fins de melhoria, não apresenta diferença significativa em relação ao material do subleito, classificado como uma argila arenosa vermelha. Uma vez que há dificuldade em reproduzir o solo melhorado com cimento em laboratório, dado que o cimento existente se encontra inerte e não é conhecida a taxa de cimento incorporada ao solo, para os fins das análises propostas neste trabalho, é razoável a consideração de um único material para ensaios laboratoriais e monitoramento de campo.

Dessa forma, apesar da simplificação técnica para avaliar a rigidez dos materiais, em que se buscou apenas comparar os solos de sub-base e subleito, a utilização do Geogauge auxiliou sobremaneira na obtenção das propriedades dos materiais destas camadas em campo, sob a ótica de uma análise qualitativa de comparação entre os materiais.

Portanto, para fins de análises laboratoriais, bem como das análises seguintes relacionadas ao dimensionamento mecânico-empírico, pode-se considerar que abaixo da camada de base

reciclada estabilizada com espuma de asfalto, o material é o mesmo para os três subtrechos, sendo caracterizado como um subleito argilo-arenoso.

No subtrecho T1, como a espessura de fresagem do pavimento pré-existente foi maior, não foram feitas considerações quanto ao material remanescente, restando, de fato, apenas a argila arenosa prevista para o subleito. Entretanto, para os subtrechos T2 e T3, fez-se a consideração de um único material após a fresagem, com base nas análises realizadas com o Geogauge, suprimindo uma possível análise da delgada camada restante do material da sub-base.

Isto posto, nos itens seguintes são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados de acordo com a metodologia deste trabalho, seguido das análises correspondentes, para as camadas do subleito, da base e do revestimento asfáltico.

4.1.1. CAMADA DE SUBLEITO

O material da camada de subleito foi avaliado com base nos resultados dos ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do Módulo de Resiliência e da Deformação Permanente. Além disso, foi submetido aos ensaios de caracterização, a fim de buscar elementos para o entendimento de seu comportamento. A Tabela 4.1 resume a caracterização feita.

Tabela 4-1 – Caracterização do subleito.

Parâmetro	Solo subleito
Localização (estaca)	407+700
Descrição	Argila Arenosa Vermelha
Limite de liquidez (wl - %)	27,5
Limite de plasticidade (wp - %)	18,3
Índice de plasticidade (IP - %)	9,1
Classificação TRB e SUCS	A-6 / SC
Índice suporte Califórnia (ISC - %)	6,62
Expansão (%)	0,01
% Pedregulho	0
% Areia grossa	0,1
% Areia média	2,6
% Areia fina	56,4
% Silte	13,2
% Argila	27,8
Classificação MCT	LA'
c'	1
d'	81,8
e'	0,8
Pi (%)	27

Por meio dos ensaios realizados, constatou-se um solo com alto teor de areia fina e argila, apresentando textura fina e baixa resistência, quando analisados os resultados de ISC. Pela classificação convencional do *Transportation Research Board* (TRB), o material é considerado como A-6, sendo um solo argiloso “fraco a pobre”, o qual seria, em teoria, inadequado para as práticas de pavimentação. Entretanto, pela classificação MCT, o solo é visto como LA’, de comportamento laterítico, que pode vir a apresentar um bom comportamento na camada do pavimento quando adequadamente compactado. Isso evidencia a importância de uma avaliação apropriada para os solos tropicais brasileiros e a inadequação, em muitos casos, da classificação americana.

Somando-se à caracterização acima detalhada, foram realizados ensaios triaxiais de carga repetida para determinação do módulo de resiliência e da deformação permanente, conforme procedimentos descritos nas normas DNIT-ME 134/2018 e DNIT 179/2018-IE. Os ensaios foram realizados pela empresa Trafecon Engenharia, contratada pela CART, e acompanhados pela mestrandia, sendo todos os procedimentos para execução dos ensaios enviados conforme a necessidade desta pesquisa, já descritos na metodologia deste trabalho.

Para a compactação, foram realizados os procedimentos descritos no Anexo D da norma DNIT 134/2018, que apresenta as condições para a compactação da amostra no molde tripartido, sendo empregada a energia normal, em moldes de 10 x 20 cm. Entretanto, antes do procedimento, foi determinada a curva de compactação do material no molde tripartido, para que o resultado não fosse influenciado de maneira equivocada pela umidade, definindo-se a densidade máxima do corpo de prova, conforme gráfico da Figura 4.1.

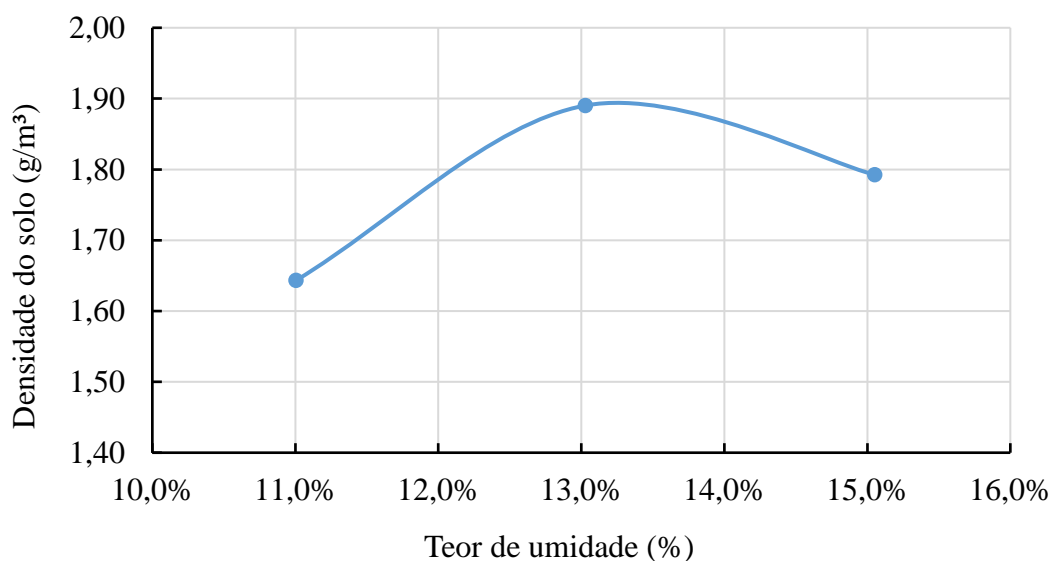


Figura 4-1 – Determinação do teor de umidade ótimo do material do subleito.

Houve certa dificuldade na definição do teor ótimo no molde tripartido, pois a curva de compactação não ficou clara quanto ao teor que representasse a máxima densidade. À vista disso, optou-se pelo teor de 13%, que em análises primárias de Módulo de Resiliência, foi aquele que retornou valores de módulo mais próximos daqueles obtidos pela retroanálise, demonstradas com mais detalhes em tópicos seguintes. Além disso, apesar de não caber uma comparação direta, foi o teor de umidade mais próximo daquele obtido quando realizado o procedimento de compactação convencional, do tipo Proctor.

4.1.1.1. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

A fim de entender o comportamento resiliente do material do subleito, quando submetido ao estado de tensões que este material está submetido na camada do pavimento devido à ação do tráfego, foi realizado o ensaio triaxial de cargas repetidas para obtenção de módulo de resiliência. Foram utilizados 3 corpos de prova, ensaiados no teor de umidade ótima, empregando a frequência de 1Hz (0,1s pulso de carga e 0,9 s de tempo de repouso), na sequência de tensões para determinação do módulo de resiliência para solos de subleito apresentada na norma DNIT 134/2018-ME.

De acordo com Paula *et al.* (2022), os modelos estatísticos para a representação da previsão do módulo de resiliência com o estado de tensão adotados na mecânica dos pavimentos foram desenvolvidos, em grande parte, a partir da natureza do solo, com preponderância da tensão confinante (σ_3) ou da tensão desvio (σ_d), relacionando tais esforços aplicados com as constantes (parâmetros) obtidas no ensaio triaxial de carga repetida.

Dessa maneira, com base no ensaio realizado na amostra do subleito, a Figura 4.2 e a Figura 4.3 exibem os resultados obtidos, apresentando os gráficos em que o material é função da tensão confinante e da tensão desvio, respectivamente.

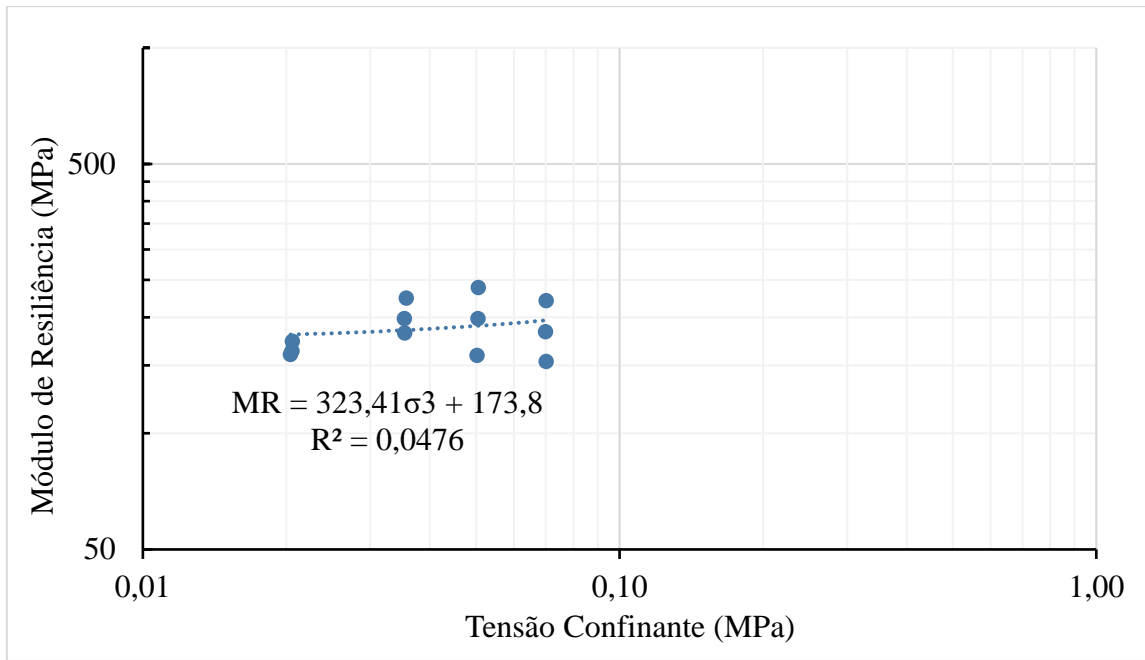


Figura 4-2 – Módulo de resiliência em função da tensão confinante (σ_3).

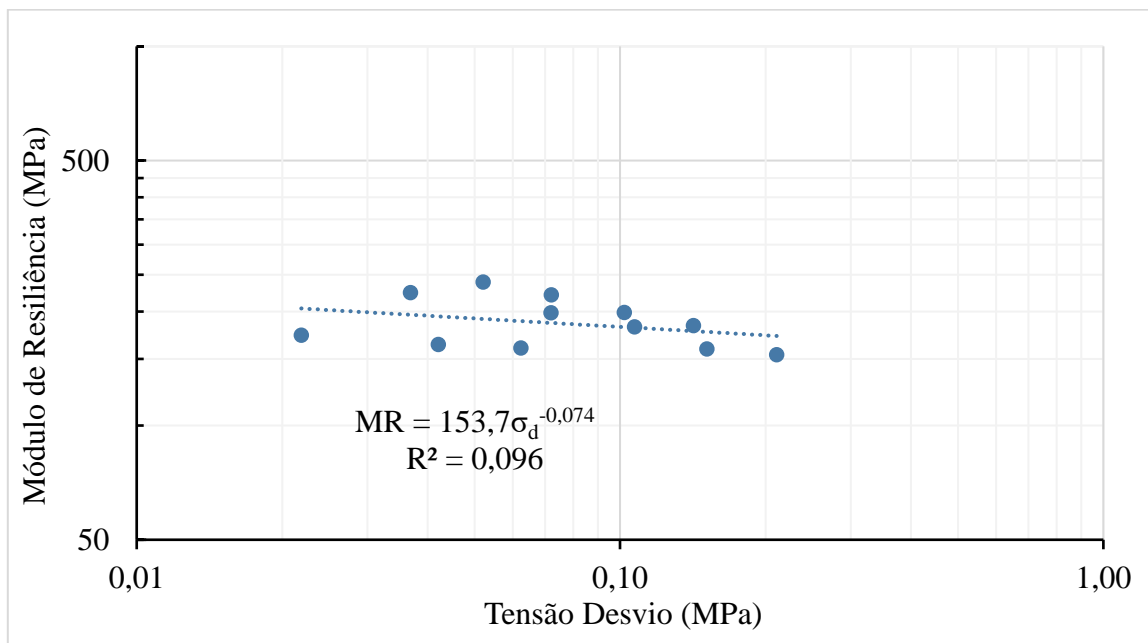


Figura 4-3 – Módulo de resiliência em função da tensão desvio (σ_d).

Por meio dos gráficos apresentados acima, é possível perceber que o comportamento material não depende claramente apenas de uma tensão, seja ela desvio ou confinante. No primeiro caso, há uma tendência de aumento do MR à medida que aumenta o confinamento, ao passo que para a tensão desvio, já há uma tendência de diminuição do MR quando há aumento da tensão. Contudo, os modelos de comportamento não apresentaram bons coeficientes de determinação (R^2), não sendo os mais adequados para o solo em questão.

Portanto, para melhor representar o comportamento do material, foi gerado o modelo composto, em função das tensões desvio e confinante, juntas, o qual pode ser empregado para qualquer tipo de solo ou brita, sendo também o modelo solicitado pelo MeDiNa.

A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros experimentais obtidos pelo ensaio triaxial k_1 , k_2 e k_3 . Esses parâmetros foram gerados por meio do programa LABFit, desenvolvido pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), localizada na Paraíba. Foi obtido um R^2 considerado razoável, de 0,676.

Tabela 4-2 – Parâmetros do modelo composto material do subleito.

Parâmetro	Resultados
k_1	296,80
k_2	0,3456
k_3	-0,2494
R^2	0,6760
$MR = 296,8 \cdot \sigma_3^{0,3456} \cdot \sigma_d^{-0,2494}$	

Como já esperado pelos gráficos dependentes individualmente das tensões desvio e confinante, o valor positivo de k_2 indica que, para um aumento da tensão confinante, há um acréscimo no módulo de resiliência do material, ao passo que, o valor negativo de k_3 indica uma redução do módulo à medida que há um aumento da tensão desvio.

Complementando a análise realizada, foi obtida a média dos valores de módulo de resiliência para cada par de tensão avaliado, a fim de quantificar aproximadamente o valor de módulo do material. A Tabela 4.3 apresenta o resultado médio de cada corpo de prova ensaiado e o desvio padrão de cada amostra individualmente, bem como a média e desvio padrão da média e o respectivo coeficiente de variação.

Tabela 4-3 – Módulo de resiliência médio do subleito.

Corpo de Prova	MR (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
CP1	180,2	22,0	12,2
CP2	206,4	42,1	0,20
CP3	177,6	24,3	0,14
Média	188,1	15,9	0,15

Além da média, empregou-se o programa de Análises Elásticas de Múltiplas Camadas (AEMC), a fim de identificar as tensões desvio e confinante críticas atuantes na camada de subleito, visando à obtenção do valor do módulo de resiliência para esta situação, ou seja, para a estimativa do estado de tensão *in situ*. Na análise foi considerada a situação mais crítica, que neste caso corresponde ao topo do subleito. A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos, considerando uma condição de aderência entre a camada de base e o subleito (37,01 cm), que

se mostrou mais representativa. Para o cadastro do material de base na análise, foi considerado o modelo resiliente não linear, com o método de cura de referência, T40D7. Para o subleito, também foi considerado o modelo resiliente não linear, mas para o revestimento, o modelo resiliente linear.

Tabela 4-4 – Módulo de Resiliência com o AEMC.

Material	Sx (σ_3) (kPa)	Sz (σ_d) (kPa)	MR AEMC (MPa)
Subleito	12,97	76,99	125,3

4.1.1.2. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

No tocante ao ensaio para obtenção da deformação permanente, este foi realizado com 6 pares de tensão, conforme apresentado na Tabela 3.7, de acordo com os procedimentos da norma DNIT 179/2018-IE. O ensaio foi realizado na frequência de 5 Hz, com 150.000 ciclos, sem nenhum procedimento de cura. Da mesma forma que para o MR, foi realizado no equipamento triaxial de cargas repetidas. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.4. Destaca-se que todos os corpos de prova suportaram todos os ciclos aos quais foram submetidos, não havendo ruptura do corpo de prova.

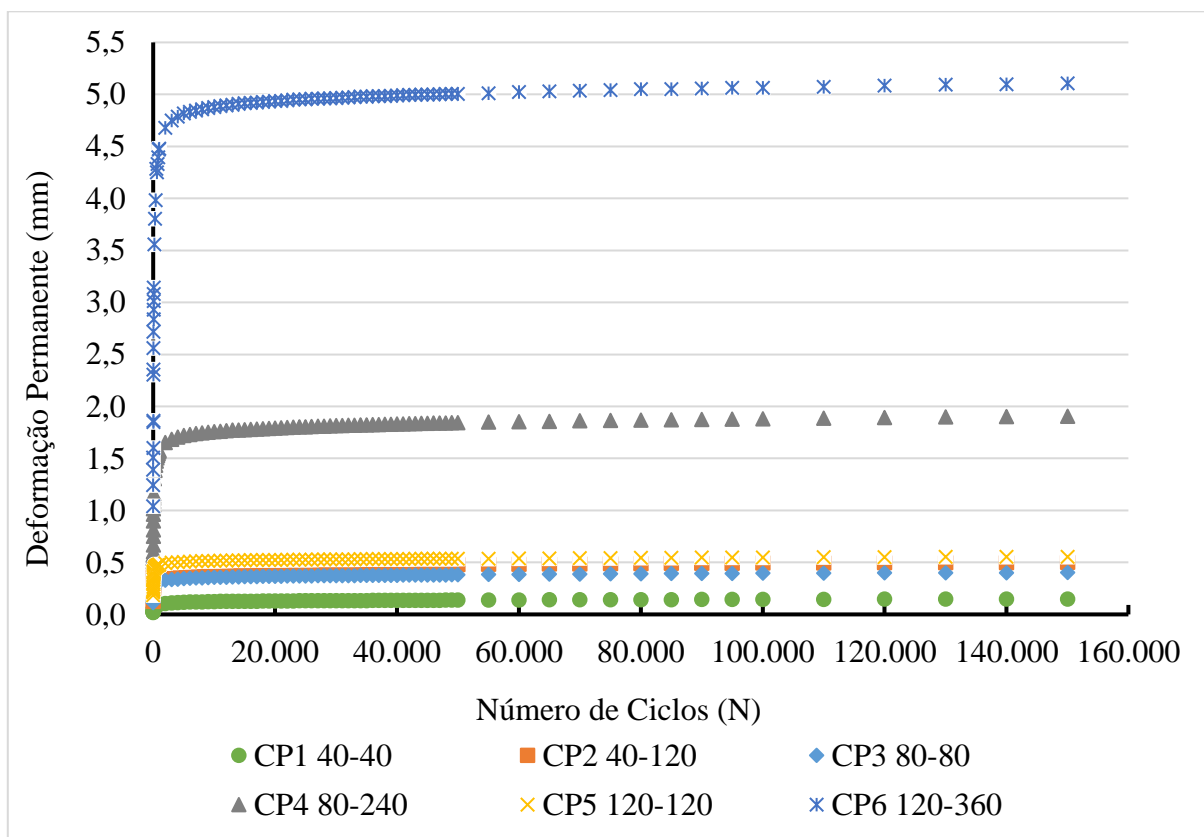


Figura 4-4 – Deformação permanente acumulada para o material do subleito.

Pelo gráfico das deformações em função do número de ciclos, é possível perceber que para níveis de tensões mais baixos, com menores diferenças entre as tensões desvio e confinante ($\sigma_3 - \sigma_d$): 40-40, 40-120, 80-80, 120-120, as deformações máximas obtidas foram pequenas, da ordem de 0,5 mm. Em contrapartida, para tensões desvio elevadas, com diferenças entre as tensões maiores ($\sigma_3 - \sigma_d$): 80-240, 120-360, as deformações máximas foram significativamente mais altas, mostrando uma influência forte da tensão desvio nesse tipo de material, retornando deformações da ordem de 5,2 mm.

Destaca-se, ainda, que para o estado tensão mais baixo, as deformações permaneceram basicamente constantes durante todos os ciclos aos quais a amostra foi submetida, não mostrando um aumento ou redução da taxa de deformação.

Esses resultados mostraram que, para um solo de subleito, cujas tensões verticais variam da ordem de 50 a 120 kPa (Santos, 2016), o solo apresenta um bom comportamento, contribuindo de maneira muito singela para a deformação total da estrutura do pavimento.

Com base nos resultados, foi possível, então, gerar o modelo proposto por Guimarães (2009), empregado no MeDiNa, considerando as deformações obtidas para os respectivos estados de tensão, apresentando respostas satisfatórias, com R^2 igual a 0,97, como apresenta a Tabela 4.5.

Tabela 4-5 – Parâmetros do modelo de deformação permanente de Guimarães (2009) para o material do subleito.

Parâmetro	Resultados	Equação
ω_1	0,1868	$\delta_p = 0,1868 \cdot \sigma_3^{0,1906} \cdot \sigma_d^{1,5573} \cdot N^{0,0993}$
ω_2	0,1906	
ω_3	1,5573	
ω_4	0,0993	
R^2	0,97	

De acordo com o modelo obtido, e pelo gráfico das deformações em função do número de ciclos, é possível enquadrar o comportamento do material como dos Tipos I e II, que indicam um acomodamento plástico, conforme a norma DNIT 179/2018-IE. Para níveis de tensão vertical e horizontal mais baixos, tem-se o Tipo I, com tendência à estabilização da deformação plástica para poucos ciclos, enquanto para estados de tensão mais elevados, aproxima-se mais do Tipo II, onde também há uma tendência de estabilização, mas com altos valores de deformação permanente acumulada antes do acomodamento.

Por fim, vale ainda avaliar o comportamento do material quanto à ocorrência de *shakedown*. De acordo com Guimarães (2009), ele ocorre quando há uma tendência ao acomodamento das

deformações permanentes que um material ou estrutura de um pavimento desenvolve quando é submetido à ação de cargas repetidas, ou seja, se acomoda em relação à deformação permanente. Segundo o autor, quando o material é avaliado por meio de ensaios triaxiais de cargas repetidas, considera-se que ele tenha apresentado *shakedown* quando a taxa de acréscimo das deformações permanentes ao longo do ensaio é da ordem de 10^{-7} metros para cada ciclo de carga aplicada.

À visto disso, apresenta-se o gráfico da Figura 4.5, onde no eixo horizontal é indicada a deformação permanente acumulada, e no eixo vertical a taxa de acréscimo da deformação permanente.

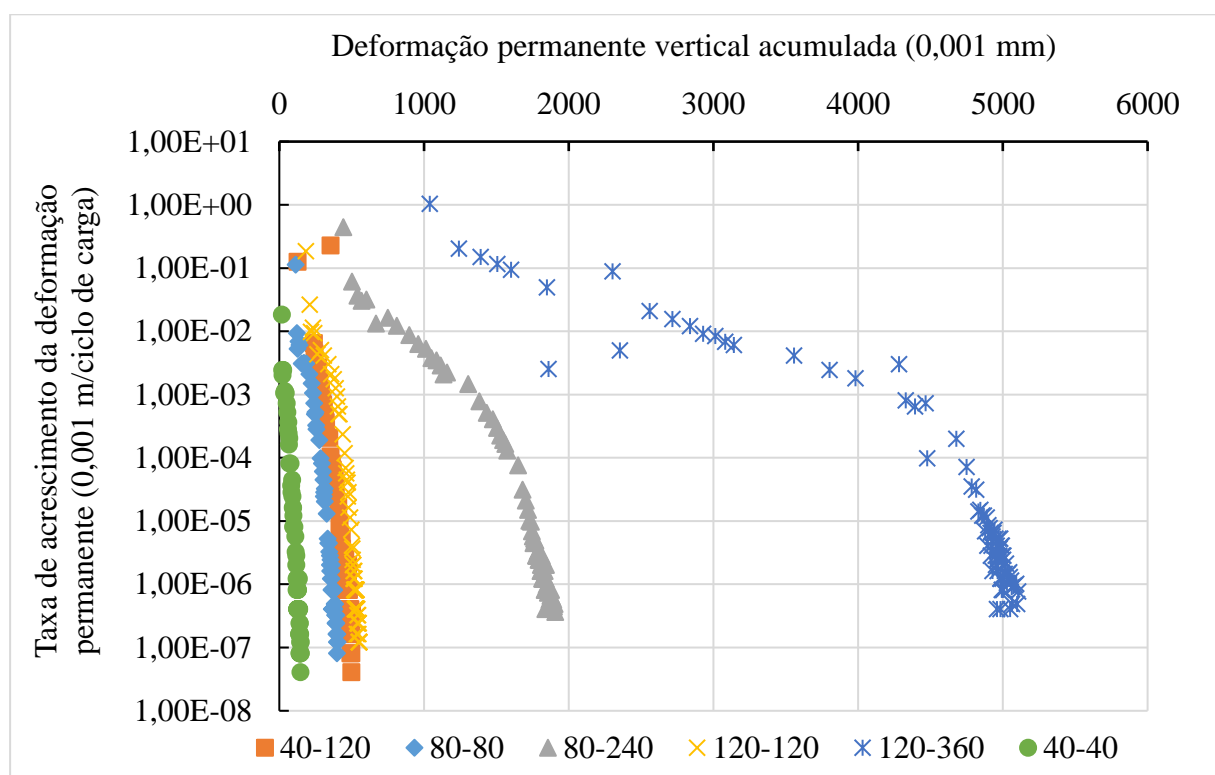


Figura 4-5 – Análise do *Shakedown* para o material do subleito.

Novamente, ao analisar este gráfico, percebe-se dois comportamentos distintos, um para estados de tensão mais baixos, onde há a estabilização da plastificação após um determinado número de ciclos, e um segundo comportamento, para os estados de tensão mais elevados, onde, apesar de haver uma tendência de paralelismo das curvas em relação ao eixo vertical (indicando um acomodamento das deformações), ainda não alcançou o valor estabelecido de 10^{-7} metros para cada ciclo de carga aplicada. Entretanto, de maneira geral, entende-se que há o acomodamento plástico, ocorrendo o *shakedown*.

4.1.2. CAMADA DE BASE

Na mistura estabilizada com espuma de asfalto, durante a dosagem, foram definidos os parâmetros de caracterização do material fresado, do ligante, bem como as propriedades exigidas na metodologia de projeto para a mistura final, mencionadas no Capítulo 2 deste trabalho. Estes ensaios não foram refeitos na ocasião da produção da mistura para execução do trecho experimental, mas ainda que os resultados obtidos se refiram àqueles adquiridos durante a dosagem, são importantes para efeitos de caracterização do material. Portanto, os principais resultados obtidos quando realizada a dosagem da mistura reciclada estabilizada com espuma de asfalto estão resumidos na Tabela 4.6.

Tabela 4-6 – Caracterização da mistura estabilizada com espuma de asfalto.

Parâmetro	Mistura estabilizada
Densidade Máxima (g/cm ³)	2,093
Umidade ótima (wot - %)	5,5
Teor de água para espumação (%)	2,2
Rest. à tração Compr. Simples Seco (kPa)	427
Rest. à tração Compr. Simples Saturado (kPa)	327
Coesão (kPa)	252
Ângulo de Atrito	36
Coesão Retida (%)	80
Classificação	BSM 1
Expansão (vezes)	15,9
Meia Vida (s)	10,3

Além da caracterização da mistura, foram realizados ensaios para obtenção do módulo de resiliência e da deformação permanente, de acordo com os procedimentos descritos na norma DNIT-ME 134/2018 e DNIT 179/2018-IE, ambos com o equipamento triaxial, mostrado na Figura 4.6, sendo todos os procedimentos dos ensaios executados conforme a necessidade desta pesquisa, já descritos na metodologia deste trabalho.

Para a compactação, foi utilizado o molde tripartido, sendo o procedimento realizado da mesma maneira para todos os corpos de prova avaliados. Para a cura à temperatura de 40°C, as amostras, após compactadas, foram mantidas em estufa pelo período de 7 ou 3 dias (T40D7 ou T40D3). Para a cura úmida, à temperatura de 25°C, os corpos de prova foram mantidos na câmara úmida visando à conservação da temperatura. No decorrer desse período, permaneceram com a superfície exposta, sem nenhuma proteção ou membrana. Finalizado o período de cura, seguiram à prensa triaxial para realização do ensaio.

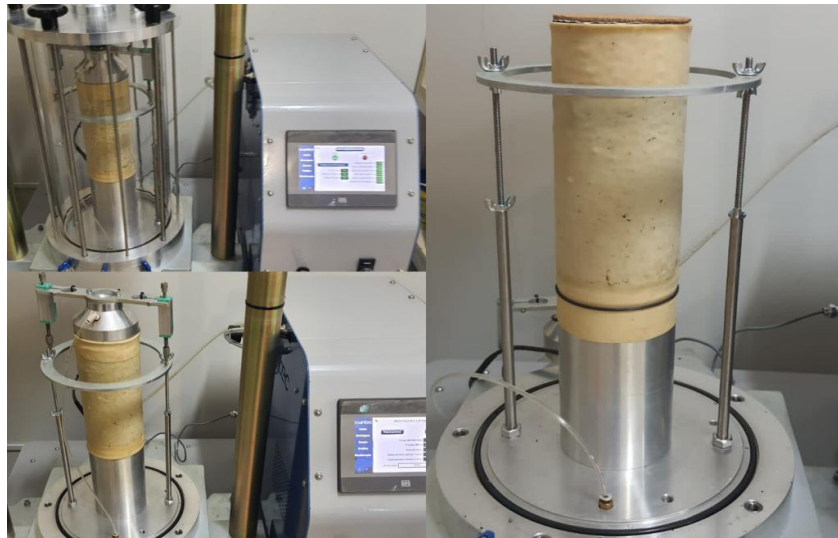


Figura 4-6 – Equipamento triaxial para ensaios de MR e DP.

4.1.2.1. MÓDULO DE RESILIÊNCIA

De maneira a avaliar a sensibilidade do material frente ao estado de tensões ao qual é submetido, foram realizados ensaios para obtenção do MR nos corpos de prova da mistura estabilizada com espuma de asfalto. Além disso, foi também avaliada a rigidez do material em diferentes condições de cura. A Figura 4.7 apresenta os resultados dos ensaios para obtenção do módulo, tanto do procedimento de cura considerado padrão (T40D7), quanto das demais formas avaliadas, mostrando a variação da rigidez do material em termos da tensão confinante aplicada.

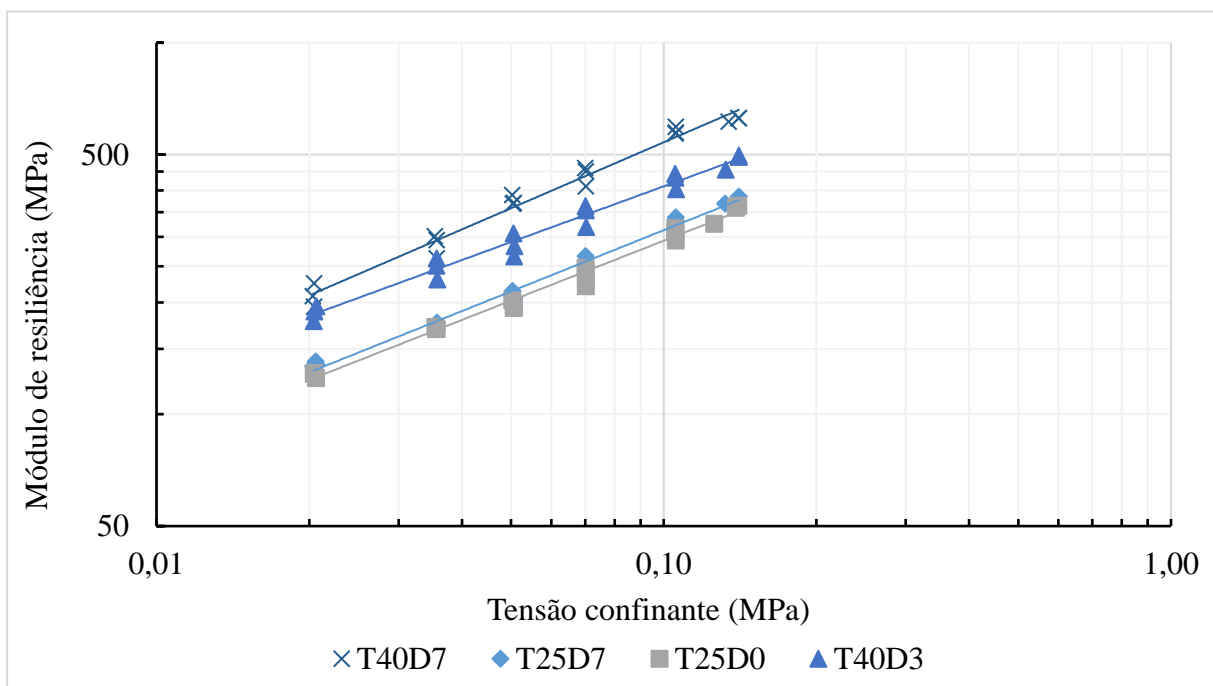


Figura 4-7 – Módulo de resiliência com diferentes curas em função da tensão confinante (σ_3).

Apesar de um comportamento distinto de módulo ao considerar diferentes processos de cura, com base nos resultados, é possível perceber, de maneira nítida, a influência do material em termos da tensão confinante, o que vai ao encontro da hipótese adotada de que a mistura se comporta de maneira semelhante ao de um material granular, fortemente afetado pela condição de carregamento e pelo estado de tensão ao qual é exposto. Percebe-se um aumento significativo da rigidez do material à medida que a tensão confinante aumenta, iniciando com módulos de resiliência da ordem de 100 MPa, e alcançando valores superiores a 500 MPa.

Em termos da tensão desvio, a percepção de influência do carregamento não foi clara, mostrando que um modelo dependente apenas da tensão desvio não seria adequado. Contudo, como mostra a Figura 4.8, ainda é importante sua consideração no modelo da mistura estabilizada com espuma de asfalto.

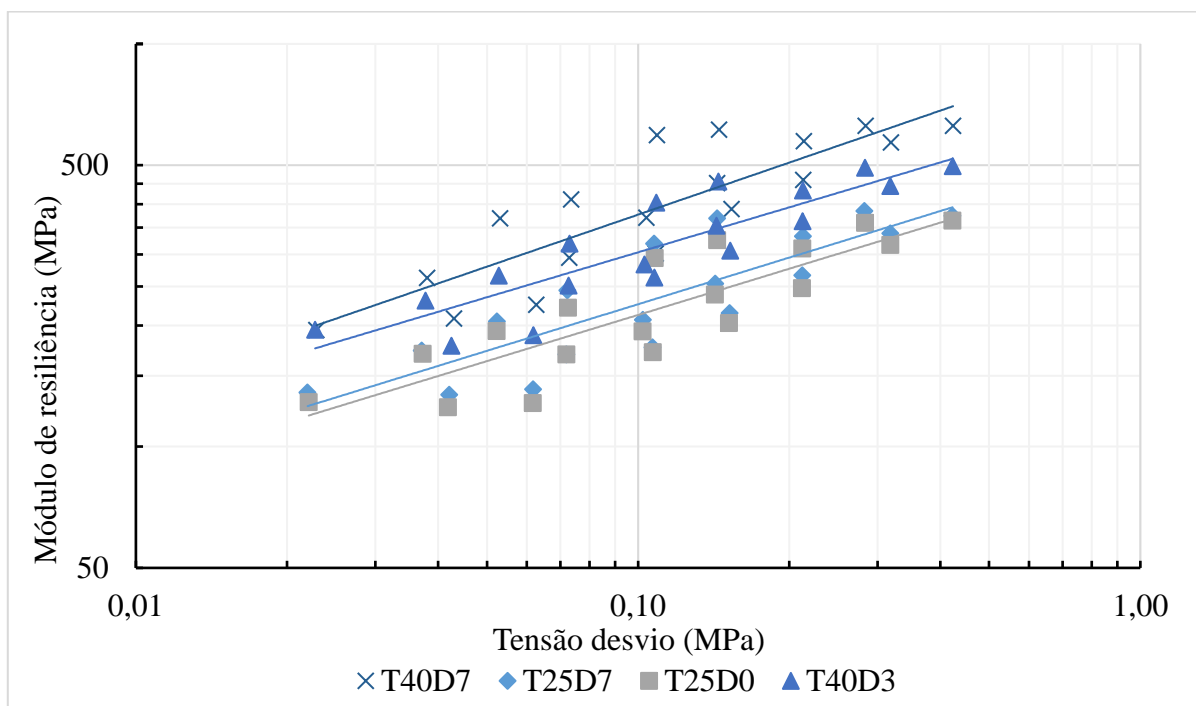


Figura 4-8 – Módulo de resiliência (MR) com diferentes processos de cura em função da tensão desvio (σ_d).

Em vista da percepção menos clara da dependência da tensão desvio, e sabendo que o modelo composto (em função das tensões desvio e confinante) é adequado para qualquer tipo de solo ou brita, sendo também o modelo adotado no MeDiNa, foram obtidos os parâmetros experimentais dos ensaios triaxiais k_1 , k_2 e k_3 , apresentados na Tabela 4.7, para cada tempo de cura avaliado.

Tabela 4-7 – Parâmetros do modelo composto de MR para a mistura estabilizada.

Parâmetro	T40D7	T25D7	T25D0	T40D3
k_1	1,924E+03	1,136E+03	1,009E+03	1,234E+03
k_2	5,362E-01	5,347E-01	4,881E-01	4,130E-01
k_3	2,579E-02	3,068E-02	6,323E-02	8,840E-02
R^2	0,9809	0,9938	0,9943	0,9944

Os parâmetros do modelo foram gerados por meio do programa LABFit, tendo sido obtidos ótimos coeficientes de determinação (R^2), todos maiores que 0,98. Dessa maneira, uma vez obtidos os parâmetros, foi possível determinar o modelo composto para cada tempo de cura avaliado, conforme apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4-8 – Equações do modelo composto de MR para a mistura estabilizada.

Parâmetro	Modelo Composto
T40D7	$MR = 1924 \cdot \sigma_3^{0,5362} \cdot \sigma_d^{0,02579}$
T40D3	$MR = 1234 \cdot \sigma_3^{0,4930} \cdot \sigma_d^{0,05202}$
T25D7	$MR = 1136 \cdot \sigma_3^{0,5347} \cdot \sigma_d^{0,03068}$
T25D0	$MR = 1009 \cdot \sigma_3^{0,4881} \cdot \sigma_d^{0,06323}$

Verifica-se pelos parâmetros obtidos, a notória interferência do estado de tensões no comportamento do material, principalmente da tensão confinante, dado que k_2 , em todos os casos, é significativamente maior que k_3 , este que está relacionado à influência da tensão desvio. Além disso, os valores positivos de k_2 e k_3 indicam que para um aumento das tensões desvio e confinante, há também um acréscimo nos valores de módulo de resiliência, indicando um comportamento mais similar ao de um solo arenoso ou material granular, cuja aplicação da tensão confere considerável coesão ao material, implicando ganhos de rigidez.

Pelos resultados, é possível ainda notar que um modelo dependente apenas da tensão confinante também retorna previsões acertadas. Analisando os gráficos da Figura 4.7, ao gerar os modelos, tem-se ótimos coeficientes de determinação (R^2), em média de 0,98, semelhantes ao modelo composto. Por sua vez, modelos dependentes apenas da tensão desvio retornaram coeficientes inferiores, da ordem de 0,73, não sendo os mais adequados para a representação do comportamento da mistura.

Além da influência das tensões no comportamento da mistura estabilizada, pôde-se também perceber um comportamento diferenciando do material de acordo com a cura adotada. A partir dos modelos gerados para cada avaliação de cura, foi realizada a média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de MR obtidos para os pares de tensão ensaiados. A Tabela 4.9 apresenta os resultados observados.

Tabela 4-9 – MR médio para diferentes métodos de cura.

Método de Cura	MR Médio (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coef. de Variação (%)
T40D7	419,0	152,6	36,4
T40D3	329,3	105,6	32,0
T25D7	246,7	87,2	35,3
T25D0	231,3	79,7	34,5

Além da média, empregou-se, da mesma forma que para o subleito, o programa AEMC, a fim de identificar as tensões desvio e confinante críticas atuantes na camada de base, visando à obtenção do valor do módulo de resiliência para esta situação, ou seja, para o provável estado de tensão *in situ*.

Portanto, para esta análise, a estrutura do pavimento foi inserida no AEMC, considerando os dados obtidos nos ensaios realizados. A mistura estabilizada e o subleito como materiais resilientes não lineares, e a mistura asfáltica como resiliente linear, de acordo com os ensaios apresentados na sequência. A situação crítica considerada para a análise foi a no meio da camada de base, cuja profundidade corresponde à 18,5 cm, com a mesma condição de aderência adotada para o subleito, cujos resultados foram mais coerentes com o esperado, como apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4-10 – Módulo de Resiliência obtido pelo AEMC.

Material	Sx (σ_3) (kPa)	Sz (σ_1) (kPa)	MR AEMC (MPa)
T40D7	65,18	149,73	423,7
T40D3	59,63	146,66	278,1
T25D7	56,98	144,41	231,3
T25D0	56,49	143,94	219,5

Inicialmente, avaliando os resultados de módulo (obtidos de ambas as formas) para a temperatura a 25°C, não houve diferenças significativas quando comparadas as amostras sem cura e com 7 dias de cura. Para 25°C/0 dias, considerando os resultados obtidos pelo AEMC, o MR alcançado foi de 219,5 MPa, enquanto para 25°C/7 dias, o MR foi de 231,3 MPa. Percebe-se, dessa forma, que nesta temperatura, a consideração da quantidade de dias não implica grandes diferenças no resultado de módulo de resiliência. Portanto, a cura com 0 dias seria a ideal por demandar menos custos e tempo.

Por sua vez, para a cura seca à temperatura de 40°C, percebe-se mudanças um pouco mais relevantes. Para 40°C/3 dias, o resultado médio obtido foi de 278,1 MPa, ao passo que para 40°C/7 dias, o módulo de resiliência aumentou significativamente, apresentado um valor médio de 423,7 MPa.

À vista disso, é possível inferir que a temperatura considerada no processo de cura implica diferenças importantes na rigidez do material, da mesma forma que a quantidade de dias de cura. Isto porque, com 3 dias, há mais umidade remanescente no material se comparada à de 7 dias, logo, o processo de consolidação do material com 3 dias de cura ainda não se encontra avançado como com 7 dias, conforme observado na Tabela 4.11.

Tabela 4-11 – Análise de umidade dos corpos de prova.

Método de Cura	Umidade Inicial	Umidade Final
T40D7	4,75%	0,55%
T40D3	4,51%	1,00%
T25D7	5,16%	4,80%
T25D0	4,99%	4,99%

Analisando a média de umidade dos corpos de prova, para cada tempo de cura, percebe-se que a umidade remanescente no material abaixou significativamente daquela obtida na compactação do corpo de prova, para os dois tempos de cura na temperatura de 40° C, mais ainda para o método com 7 dias. Em contrapartida, para a temperatura de 25°C com sete dias de cura, a redução foi baixa, resultando em uma umidade muito similar à cura com 0 dias, o que justifica valores de módulo de resiliência quase iguais.

Evidentemente, com as análises feitas, não é possível definir com exatidão qual o período de cura ideal para previsão do comportamento adequado do material em campo. Contudo, apesar da adoção de uma cura acelerada para moldagem do corpo de prova, fica claro que a quantidade de dias (para 40°C) influencia no resultado do módulo de resiliência, e que a realização dos ensaios com o corpo de prova à temperatura de 25°C pode vir a causar subdimensionamentos.

4.1.2.2. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Somando-se às avaliações feitas, foi também realizado o ensaio para obtenção da deformação permanente, esta que é caracterizada pelo somatório dos afundamentos verticais da camada causado pelo carregamento aplicado na superfície do pavimento (Paula *et al.*, 2022).

O ensaio, também realizado no equipamento triaxial de cargas repetidas, foi feito considerando-se o período de cura padrão, na temperatura de 40°C durante 7 dias na estufa, onde foram analisadas as deformações plásticas (δ_p) geradas para cada estado de tensão avaliado. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.9.

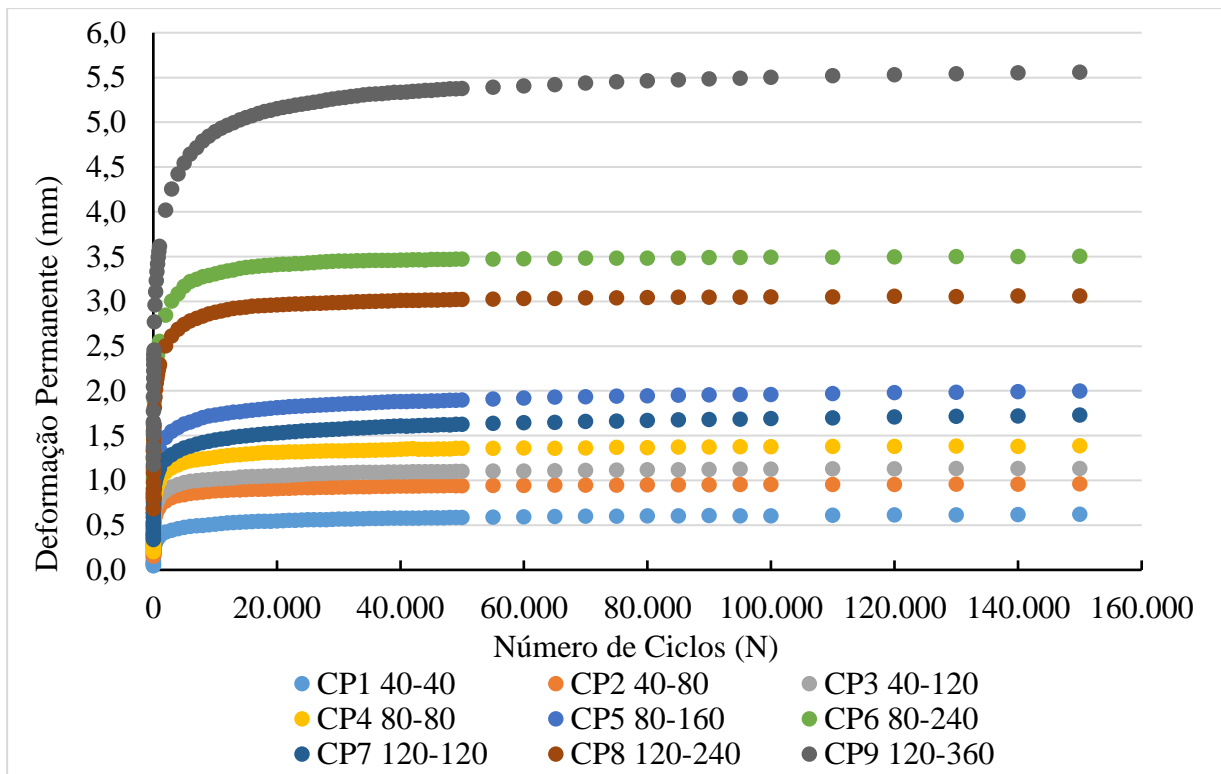


Figura 4-9 – Deformação permanente acumulada para o material da base.

Por meio da análise das deformações em função do número de ciclos, em geral, percebe-se que as menores deformações ocorreram para os estados de tensão com menores diferenças entre as tensões confiante e desvio ($\sigma_3 - \sigma_d$): 40-40, 40-80, 40-120, 80-80, 80-160 e 120-120. Nestes pares de tensão, a deformação máxima foi de, aproximadamente, 2 mm. A partir daí, para diferenças de tensões mais elevadas (80-240, 120-240, 120-360), também com tensões desvio maiores, tem-se deformações permanentes mais altas, chegando à aproximadamente 5,6 mm de deformação acumulada, o que mostra a influência da tensão nas deformações estudadas. Todos os corpos de prova suportaram todos os ciclos aos quais foram submetidos, não ocorrendo a ruptura do corpo de prova.

De forma a analisar a magnitude desse valor, é possível comparar com as deformações máximas permitidas pelo MeDiNa. Considerando uma via do Sistema Arterial Primário, é permitida uma deformação máxima de 13 mm. Logo, os valores obtidos de deformação para a mistura estabilizada, somando-se aos valores de deformação permanente obtidos para a camada do subleito, retornam deformações na faixa de 10,8 mm (5,2 mm do subleito mais 5,6 mm da base), dentro do limite estabelecido pelo MeDiNa. Para todos os pares de tensão, percebe-se que grande parte da deformação ocorre nos primeiros 40.000 ciclos, apresentado ganhos pequenos após esta quantidade, indicando uma redução da taxa de deformação por ciclo. Além disso, como visto, o aumento da tensão desvio, em geral, implica aumento da deformação permanente.

Com relação à tensão confinante, de acordo com Paula *et al.* (2022), espera-se que o aumento da tensão confinante reduza a deformação permanente acumulada, em função da maior coesão conferida ao material. Contudo, em geral, não é possível garantir com clareza esse resultado, diferentemente da tensão desvio, onde esta percepção é mais clara.

Portanto, com base nos resultados apresentados, foi possível obter o modelo de previsão da deformação permanente idealizado por Guimarães (2009), o qual é empregado no MeDiNa, e é capaz de retratar o comportamento plástico do solo quando submetido a diferentes níveis de tensão. Um resumo dos parâmetros do modelo é apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4-12 – Parâmetros do modelo de deformação permanente de Guimarães (2009) para o material da base.

Parâmetro	Resultados	Equação
ω_1	0,1697	$\delta_p = 0,1697 \cdot \sigma_3^{0,3238} \cdot \sigma_d^{0,8776} \cdot N^{0,1425}$
ω_2	0,3238	
ω_3	0,8776	
ω_4	0,1425	
R ²	0,95	

Percebe-se, de acordo com o modelo obtido e conforme as indicações da norma DNIT 179/2018-IE, que há uma tendência à estabilização da deformação permanente com o número de ciclos de carregamento, enquadrando-se no comportamento do Tipo I para os pares com diferenças de tensão menores, e o comportamento do Tipo II para os pares de tensão com diferenças maiores, comportamento similar ao observado para o material do subleito. O coeficiente de determinação (R²) foi considerado ótimo, apresentando boa aplicação do modelo.

Também foi possível avaliar o comportamento do material com relação ao acomodamento das deformações, o *shakedown*, como também previamente analisado para o material do subleito. Isto posto, é apresentado o gráfico da Figura 4.10, onde é exibido, no eixo das abcissas, a deformação permanente acumulada, e no eixo das ordenadas a taxa de acréscimo da deformação permanente.

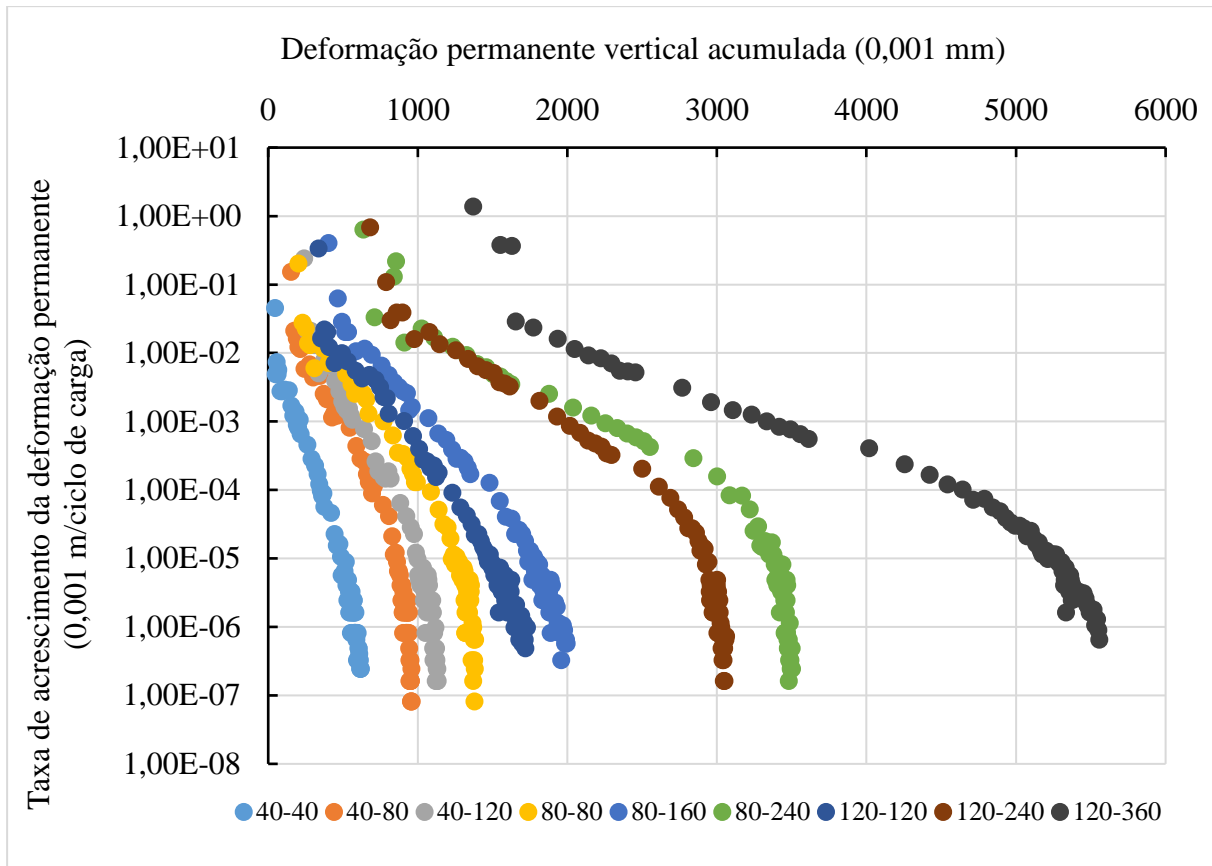


Figura 4-10 – Análise do *shakedown* para o material da base.

Como também observado para o material do subleito, quando as curvas geradas pelo gráfico da taxa de acréscimo da deformação pela deformação acumulada tendem a ser paralelas no eixo vertical, fica caracterizado o *shakedown*. Isto pode ser observado nos primeiros pares de tensão da mistura estabilizada ensaiada, em que até o par de tensão 80-160, há uma tendência de paralelismo das curvas em relação ao eixo vertical, com a taxa de acréscimo próxima de 10^{-7} metros, em alguns casos, inclusive, sendo superior a tal limite. Já para os pares de tensão maiores (120-240, 80-240), com tensões desvio e confinante mais significativas, tem-se maiores deformações iniciais, seguidas de um acomodamento plástico, com exceção do último par (120-360), onde a taxa de acréscimo de deformação é próxima de 10^{-6} metros, mas que tende, também, a um acomodamento para maiores ciclos. Esta percepção reforça ainda mais a influência da tensão desvio no comportamento do material.

Dessa forma, diante das análises feitas e dos modelos gerados, em termos das características de deformabilidade do material, foram obtidos dados suficientes para o cadastro da mistura estabilizada no programa MeDiNa, considerando-a como um material granular, devendo ser inseridos no *software*, portanto, os modelos de deformação permanente e de módulo de resiliência. As análises realizadas no programa serão apresentadas mais adiante.

4.1.3. CAMADA DE REVESTIMENTO

Para o material do revestimento asfáltico, não foi possível realizar todos os ensaios previstos ao tempo de defesa dessa dissertação. Inicialmente, foram previstos os ensaios de Módulo de Resiliência, Fadiga e *Flow Number*, contudo, apenas o ensaio de Módulo de Resiliência foi feito, e apenas para a mistura de CBUQ, a qual foi empregada nos trechos T1 e T2.

O ensaio foi realizado de acordo com a norma DNIT 135/2018-ME, no INFRALAB da Universidade de Brasília, a partir da reprodução da dosagem da mistura em laboratório, conforme Tabela 3.1, apresentada na metodologia deste trabalho. Também foi realizado o ensaio de Resistência à tração (RT), conforme norma DNIT 136/2018-ME, pois trata-se de um ensaio necessário para obtenção do módulo de resiliência.

A Figura 4.11 apresenta parte dos procedimentos desenvolvidos durante a realização do ensaio, em que se destaca a separação dos agregados, a montagem dos corpos de prova Marshall, e a aplicação da carga na prensa para os ensaios de resistência à tração e módulo de resiliência.



Figura 4-11 – Etapas do ensaio de Módulo de Resiliência.

Os ensaios foram realizados à temperatura de 25° C, na frequência de 1Hz, com coeficiente de Poisson fixado em 0,30. Além disso, conforme preconiza a norma, o ensaio de RT foi realizado em três corpos de prova, cuja carga do ensaio de módulo de resiliência escolhida foi

estabelecida entre 5% a 25% da carga de ruptura do ensaio de RT, sendo definida a de 20%. Portanto, a partir disso, o ensaio de MR também foi realizado em três corpos de prova, conforme resultados apresentados na Tabela 4.13. Os corpos de prova ensaiados foram escolhidos aleatoriamente entre os CPs moldados.

Tabela 4-13 – Módulo de Resiliência CBUQ dos trechos T1 e T2.

Corpo de prova	MR (Mpa)
CP2	9963
CP6	8757
CP7	10600
Média	9773

Os resultados mostraram uma mistura com um módulo elevado, o qual entende-se ser coerente, por ser composta por um ligante modificado (*Stylink*, da Betunel), o qual é capaz de fornecer uma mistura altamente resistente à deformação, à fadiga e ao envelhecimento, segundo as informações da fabricante.

4.2. MONITORAMENTO

4.2.1. AFUNDAMENTO DE TRILHA DE RODAS

Como parte da avaliação funcional e ao mesmo tempo estrutural do pavimento, foi realizado o levantamento do Afundamento de Trilha de Rodas (ATR) em roda a extensão dos trechos experimentais. O levantamento foi realizado com o intuito de avaliar a deformação permanente do pavimento, o qual resulta especialmente da repetição das cargas no pavimento. O levantamento, como previamente detalhado, foi realizado com a treliça metálica.

A primeira leitura de ATR foi realizada no dia 17 de dezembro de 2021, momento em que se percebeu os primeiros valores de deformação plástica. A partir daí, mais três leituras foram executadas, finalizando em 30 de maio de 2022, como forma de acompanhar a evolução do defeito.

Todas as leituras foram realizadas tanto na trilha de roda externa, o Bordo Direito (BD), quanto na trilha de roda interna, o Bordo Esquerdo (BE). Entretanto, para fins de análise da deformação permanente, foram utilizados os dados apenas do BE, uma vez que se mostraram incoerentes as leituras observadas no BD. Em muitos casos, as leituras desta trilha de roda diminuía significativamente em algumas estacas, enquanto em outras aumentaram, comportamento este que seria mais esperado. Entende-se que essas discrepâncias possam ser justificadas pelas

diferenças do operador em cada leitura, bem como pelo próprio método em si, pois um levantamento realizado a poucos centímetros do previamente feito, pode implicar diferenças não associadas à evolução do defeito. Sendo assim, a Figura 4.12 apresenta a evolução do ATR, utilizando a média do afundamento observado das estacas, por trecho, para o BE.

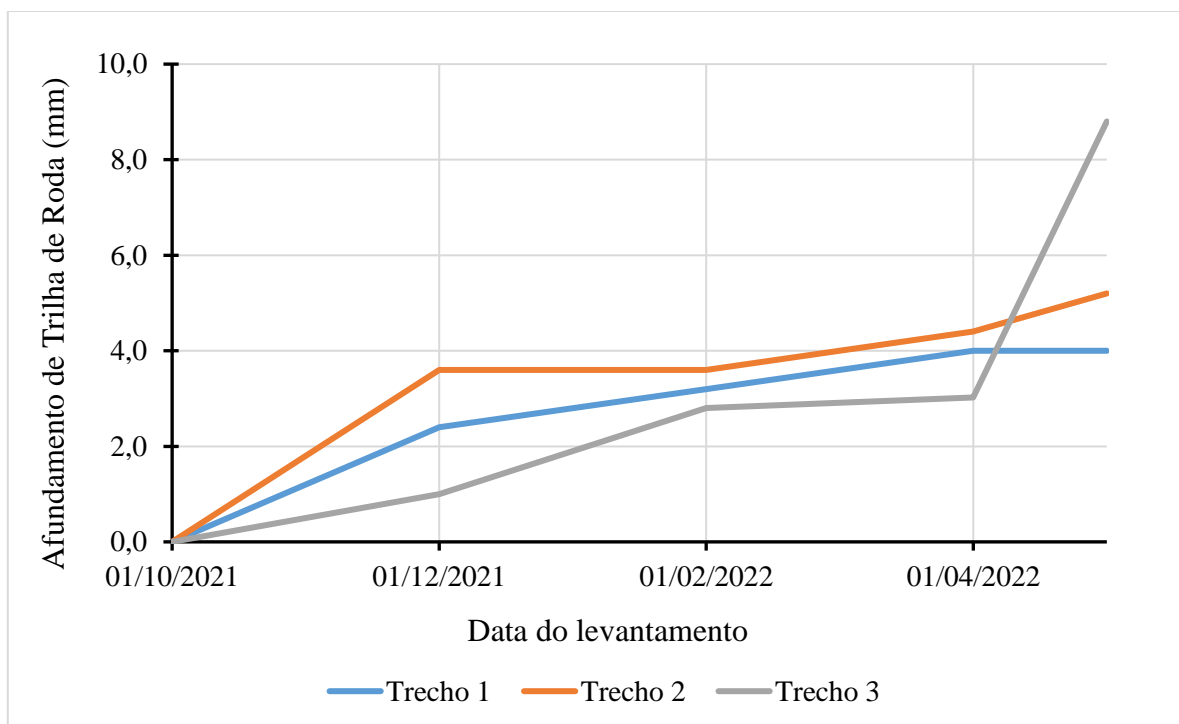


Figura 4-12 – Evolução do Afundamento de Trilha de Rodas.

É possível perceber um nítido aumento de ATR quando comparadas as leituras iniciais e finais, nos três segmentos experimentais. No T3, a deformação alcança mais de 8,0 mm, enquanto nos Trechos 1 e 2, alcançam 4 e 5 mm, respectivamente. Em razão dos trechos 2 e 3 estarem subdimensionados, espera-se, de fato, deformações permanentes mais significativas quando comparadas ao T1. Ademais, o T3 possui como revestimento asfáltico uma fina camada de gap-graded, a qual foi executada como “camada de sacrifício”, esperando-se, realmente, deformações maiores, tendo em vista o processo de consolidação esperado pela mistura estabilizada.

Apesar de um afundamento já esperado, observa-se que os valores obtidos com menos de 7 meses após a construção do trecho experimental estão elevados, até mesmo para o T1, que conta com a solução original de projeto. Isto pode estar atrelado ao próprio processo de consolidação da mistura estabilizada com espuma de asfalto, como também ao período de chuva prolongado que enfrentou a região em que se encontra os trechos experimentais, o que pode ter corroborado para um processo de deterioração acelerado do pavimento.

4.2.2. DEFLEXÕES COM A VIGA BENKELMAN

Periodicamente, nos três subtrechos experimentais, as deflexões do pavimento foram lidas com a Viga Benkelman, buscando avaliar a progressão destas durante a vida útil. As leituras, inicialmente, se deram aproximadamente, com a distância de dez dias e, posteriormente, a frequência foi reduzida, pois as mudanças percebidas entre as leituras foram menores, conforme já apresentado no cronograma da Tabela 3.4.

Em todas as estacas cujo levantamento deflectométrico foi realizado, definiu-se a bacia de deflexão, tendo em vista a importância desse parâmetro para a caracterização do estado de tensão de uma estrutura de pavimento, servindo, também, para a realização de correlações e retroanálises dos módulos das camadas.

Os gráficos das Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15 apresentam a evolução das deflexões do conjunto de camadas no período compreendido entre outubro/2021 e maio/2022, para os trechos T1, T2 e T3, respectivamente. Ressalta-se que as leituras, em todos os trechos, foram feitas de 10 em 10 m. Porém, para esta análise, foi desconsiderada as estacas próximas às divisas entre os subtrechos, uma vez que há efeitos na transição entre as estruturas dos pavimentos que podem vir a influenciar nos resultados obtidos. Nessa transição, há problemas relacionados à diferença de rigidez entre as camadas e à dificuldade de compactação.

De fato, no contato do pavimento existente da rodovia com pavimento implementado no T3, em que há à menor espessura de camadas sobre o subleito, houve defeitos, sendo estes pouco extensos e concentrados na divisa dos pavimentos. Considera-se muito importante que se tenha atenção a este aspecto quando da implantação de subtrechos experimentais sequenciais, com diferentes configurações de pavimento, sendo recomendável que haja redução gradativa das rigidezes dos pavimentos, a fim de minimizar o efeito de bordo.

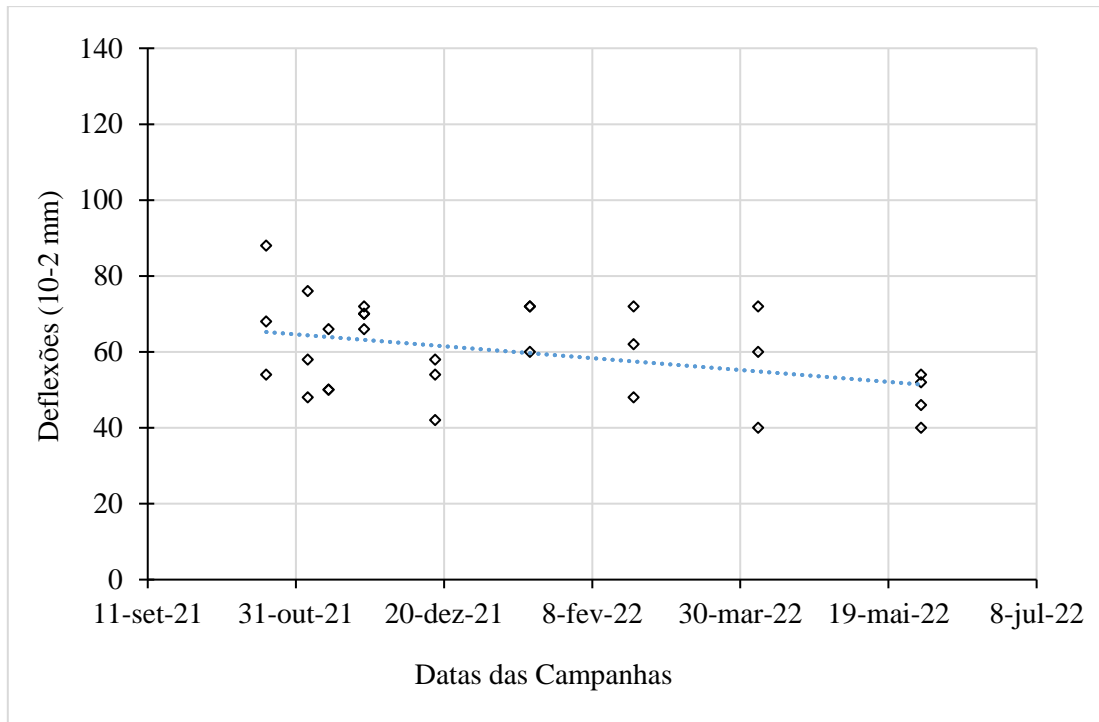


Figura 4-13 – Evolução das deflexões máximas no Trecho 1.

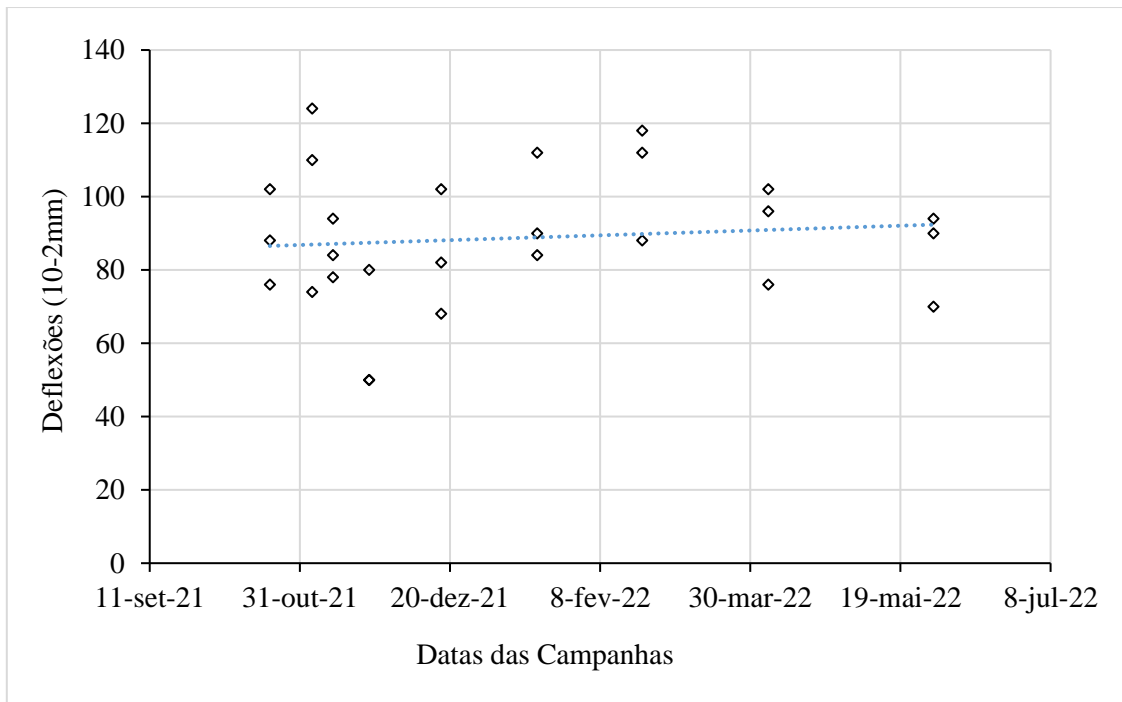


Figura 4-14 – Evolução das deflexões máximas no Trecho 2.

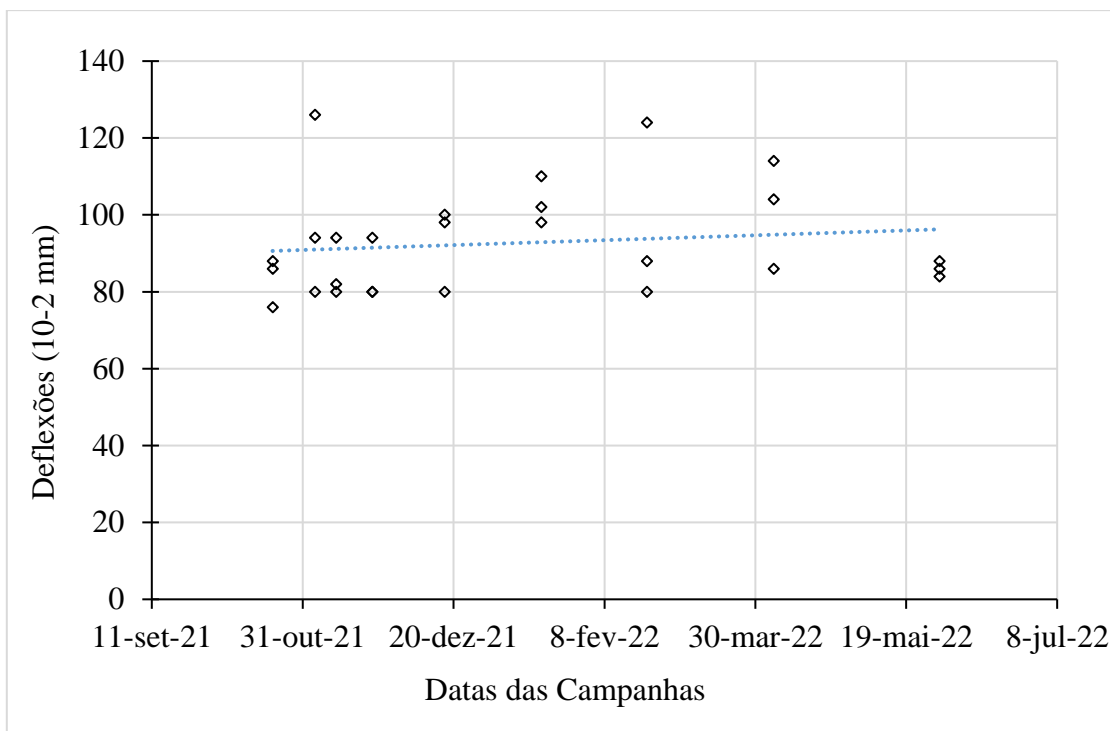


Figura 4-15 – Evolução das deflexões máximas no Trecho 3.

Pela análise dos três gráficos, percebe-se que no trecho T1, apesar da dispersão dos dados, houve uma tendência de redução das deflexões do conjunto de camadas, as quais são bem evidenciadas quando analisadas a primeira e a última leituras. Por sua vez, para os outros dois trechos, não houve uma mudança significativa, havendo basicamente uma estabilização das deflexões, apresentando, na realidade, um leve aumento quando comparadas as leituras iniciais e finais.

O comportamento do trecho T1 aproximou-se mais do esperado na literatura, que menciona uma redução das deflexões com o passar do tempo. Tal pode estar relacionado à questão da escala, tendo em vista que sua espessura não foi reduzida, sendo o segmento que manteve a solução original, em que todas as camadas foram construídas nas espessuras definidas em projeto. Percebe-se, pela análise da linha de tendência no gráfico, que as leituras saíram de valores da ordem de 67 para valores abaixo de 52, o que se trata de uma redução significativa para o período em análise.

Já nos outros dois trechos, tem-se uma redução da ordem da metade da espessura da camada projetada para base (32 cm para 15 cm), visando à aceleração dos danos. Dessa forma, a percepção da contribuição da camada de base estabilizada com espuma é menor, onde a variação da deflexão do conjunto de camadas praticamente não ocorre dentro do período de monitoramento, apesar da tendência de aumento da deflexão.

A sutil tendência de aumento da deflexão máxima do conjunto de camadas poderia indicar, inicialmente, que a rigidez da camada de mistura estabilizada com espuma de asfalto poderia estar reduzindo, sendo os 15 cm de espessura insuficientes para a dissipação das tensões promovidas pelo tráfego. Entretanto, corroborando com os resultados apresentados mais a seguir, entende-se que houve um bom comportamento do trecho, uma vez que mesmo com a espessura da camada substancialmente reduzida, obteve-se praticamente a manutenção das deflexões e a ausência de trincamento no trecho, comportamento não esperado em razão do subdimensionamento provocado.

No caso do T1, com espessura de base conforme projeto (32 cm), houve redução da deflexão global, e as retroanálises indicaram um aumento do MR. Nos subtrechos T2 e T3, com espessuras de base mais esbeltas, definidas assim para acelerar os danos, mesmo com o sutil aumento das deflexões, os módulos retroanalizados da base aumentaram. A espessura de 15 cm não absorveu as tensões mobilizadas pelo tráfego a níveis inferiores aos que poderiam ser suportados pelo subleito, sendo o aumento da deflexão o reflexo dos danos desta camada.

4.2.3. ANÁLISE DAS PRECIPITAÇÕES

Como mencionado, um dos fatores que podem influenciar nos resultados obtidos é a condição climática da região em que se insere o trecho experimental. À vista disso, foram coletados dados de precipitação e temperatura médias de estações meteorológicas próximas à região, a fim de subsidiar o entendimento do comportamento do pavimento.

A estação meteorológica mais próxima encontrada, com dados anuais completos de precipitação e temperatura, foi a de Bauru/SP, cidade onde se localiza a sede da concessionária CART. A distância da estação até o trecho é de, aproximadamente, 150 km. Os dados foram obtidos por meio do IPMet – Centro de Meteorologia de Bauru – FC/Unesp, e estão resumidos na Figura 4.16. As informações consideradas foram coletadas a partir de janeiro de 2021 a maio de 2022. Logo, nos meses em que havia dois dados de precipitação, foi calculada a média. Nos demais meses foram adotados apenas os dados de 2021.

Apesar da distância da estação meteorológica em relação ao TE, considera-se que os dados sejam representativos para avaliar a influência do clima no comportamento dos pavimentos.

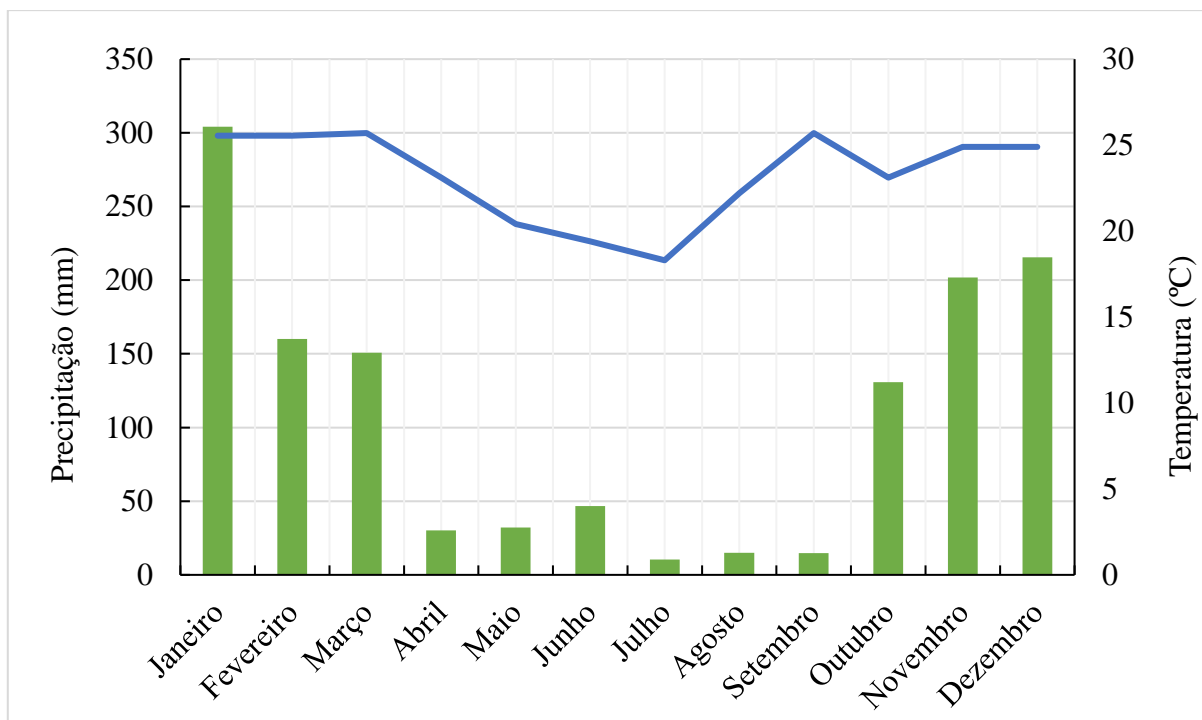


Figura 4-16 – Dados meteorológicos trecho experimental.

Dessa forma, a partir dos dados obtidos, observou-se que o período de avaliação do trecho experimental concentra-se nos meses de maiores precipitações na região. De acordo com os dados, a estação de maior precipitação ocorre entre outubro e março, quando então começa a transição para o período seco. Os meses com precipitações mais elevadas são dezembro e janeiro, enquanto as menores precipitações ocorrem em julho e agosto.

Isto posto, infere-se que o trecho experimental passou por um período de chuva considerável, o que pode afetar significativamente as deflexões do pavimento, principalmente nos trechos que já estavam subdimensionados, podendo esta ser a causa da sutil tendência ao aumento das deflexões observada. Essa análise vai ao encontro dos resultados apresentados, uma vez que as percepções mais claras de redução das deflexões no pavimento ocorrem a partir de abril/maio, quando começa a estação seca.

Soma-se a isso um ponto importante, que é o processo de consolidação do pavimento, no que se refere à redução da umidade na camada de base. Como o período principal da avaliação do trecho experimental ocorreu na época mais chuvosa da região, o processo de consolidação ocorre de forma mais morosa quando comparada ao período seco. Portanto, a redução das deflexões é percebida de forma mais lenta, visto que há maior dificuldade para que elas possam reduzir, principalmente nos trechos subdimensionados.

4.2.4. DEFLEXÕES COM O FWD

Além das determinações das bacias de deflexão com a Viga Benkelman, também foi realizada uma campanha de leituras com o FWD, quatro meses após a construção do trecho experimental. Nesse mesmo dia, em sequência ao levantamento das bacias com FWD, foram feitas medições com a Viga Benkelman, a fim de se obter uma correlação específica para o trecho em questão. Buscando uma correlação entre os valores das deflexões da bacia deflectométrica, as distâncias de leituras das deflexões na VB foram as mesmas dos sensores (geofones) do FWD.

No que se refere à leitura com o FWD, foram necessárias correções de carga e temperatura, visando uma padronização dos resultados de deflexão. Também, como explicado anteriormente, foi realizada uma correção das leituras fornecidas por um dos geofones do FWD que apresentou problema, pois a leitura do sensor a 20 cm (D_{20}) da aplicação da carga não estava coerente com a deflexão máxima (D_0) e com a de 30 cm (D_{30}).

As deflexões com o equipamento FWD foram medidas no dia 22/02/2022, nos três segmentos experimentais, por empresa contratada pela Concessionária CART. As bacias geradas por meio dos resultados enviados pela empresa estão apresentadas na Figura 4.17. Segundo os dados, a temperatura do pavimento era de 43°C e do ar de 29°C em toda as leituras.

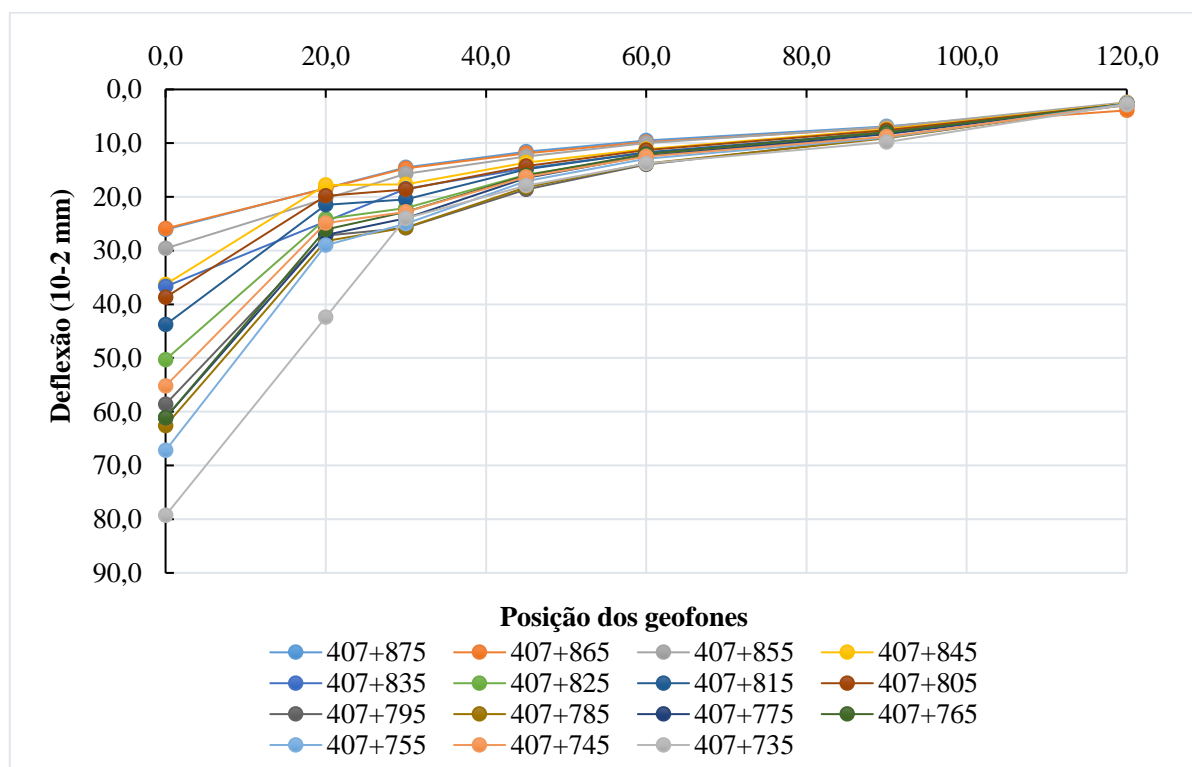


Figura 4-17 – Bacia deflectométrica FWD do dia 22/02/2022 sem correções.

Por meio do formato da bacia, fica evidente que a leitura correspondente ao geofone de 20 cm não está coerente, uma vez que apresenta valores muito similares ao geofone de 30 cm, o que não é esperado. Desse modo, de acordo com as equações e procedimentos apresentados na metodologia deste trabalho, foram realizadas, nesta sequência, a correção da temperatura, da carga e, por fim, do geofone que apresentou problema, o qual se refere à leitura correspondente à distância de 20 cm. As deflexões corrigidas são apresentadas na Tabela 4.14.

Tabela 4-14 – Deflexões corrigidas pela carga, temperatura e geofone.

Estaca	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
407 + 874	22,8	16,6	12,7	10,1	8,3	6,0	2,6
407 + 864	22,5	16,1	12,8	10,3	8,5	6,2	3,4
407 + 854	25,9	19,0	13,8	11,0	8,8	6,1	2,1
407 + 844	31,9	22,2	15,6	12,0	9,8	6,5	2,3
407 + 834	32,3	22,8	16,3	12,9	10,4	7,9	2,5
407 + 824	44,5	29,1	19,6	14,1	10,9	6,9	2,4
407 + 814	38,7	26,1	18,1	13,2	10,3	7,1	2,4
407 + 804	34,4	23,7	16,5	12,7	10,0	6,8	2,4
407 + 794	52,0	34,7	22,9	16,5	12,4	7,9	2,5
407 + 784	55,7	35,2	22,9	16,2	12,3	8,1	2,5
407 + 774	56,5	33,9	22,2	15,3	11,5	7,7	2,6
407 + 764	56,5	32,8	21,1	14,8	11,1	7,4	2,5
407 + 754	62,6	36,5	23,3	15,9	12,0	8,4	2,5
407 + 744	51,1	31,6	21,1	15,1	11,6	8,1	2,7
407 + 735	74,7	38,0	22,6	16,9	13,0	9,2	2,6

Com o intuito de observar a mudança no formato da bacia de deflexão, a Figura 4.18 apresenta a correção dos dados realizada, exposta na metodologia deste trabalho. Inicialmente, foi corrigida a temperatura, na sequência a carga e, por fim, a leitura do geofone correspondente à distância de 20 cm do prato de carga de aplicação do FWD, a qual apresentou-se incoerente em relação às demais leituras.

Com isso, é possível visualizar que as deflexões do ponto D20 apresentaram-se mais razoáveis, indicando um formato de bacia esperado para um levantamento deflectométrico com o emprego do FWD.

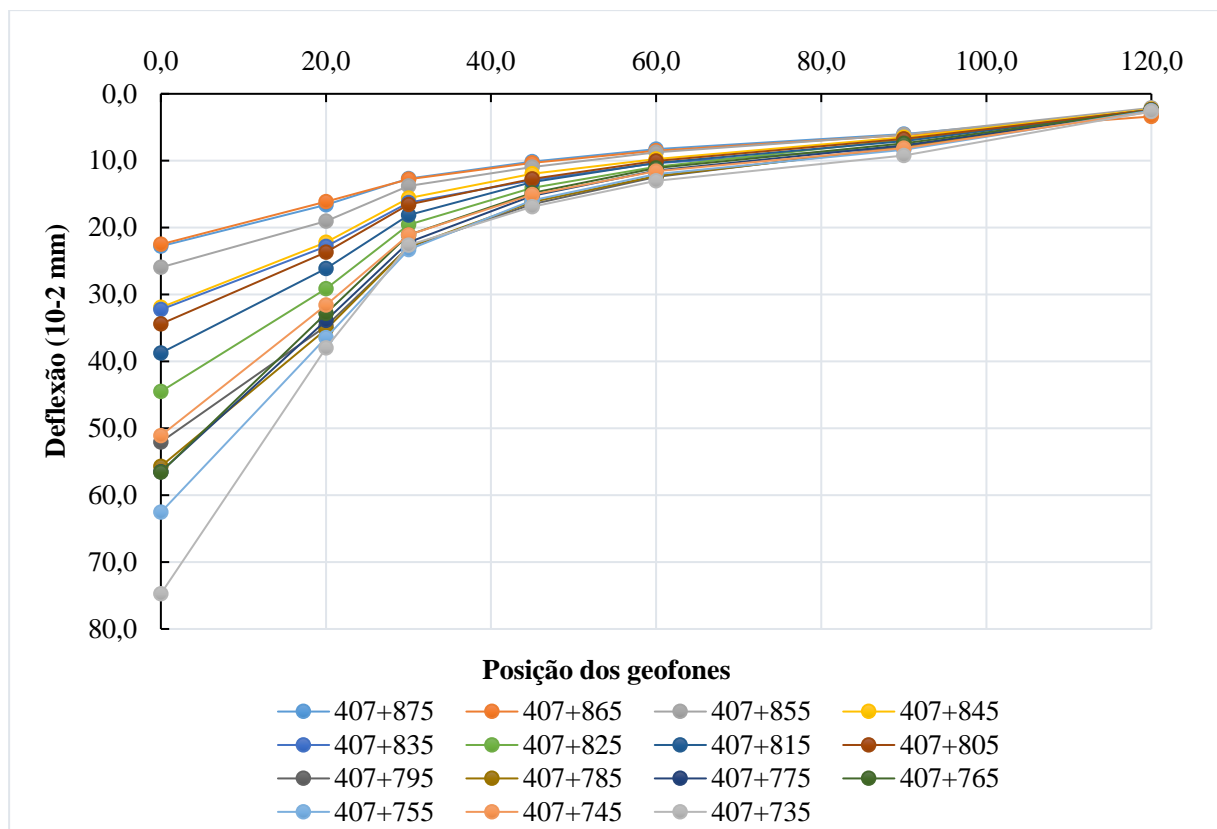


Figura 4-18 – Bacias deflectométricas do FWD corrigidas.

4.2.5. CORRELAÇÃO ENTRE FWD E VIGA BENKELMAN

Quanto aos dados do FWD, não foi possível comparar com alguma outra leitura, pois no período de realização desta pesquisa, foi feito apenas um levantamento com o equipamento no trecho experimental. Contudo, como já mencionado, além de fornecer os dados para as retroanálises, o levantamento também contribuiu para a definição de uma correlação entre os valores de deflexão da Viga Benkelman e do FWD, pois foi possível executar ambos os levantamentos em sequência, no mesmo dia.

Sabe-se que a correlação entre os dois equipamentos não é o ideal. Contudo, diante das limitações de mobilização do FWD para o trecho, e tendo em vista que as leituras puderam ser realizadas sob as mesmas condições, entende-se que este artifício possa ser realizado para obtenção das leituras necessárias ao entendimento do comportamento do trecho experimental.

Como os trechos experimentais apresentam soluções de pavimentação diferentes, foi realizada uma correlação para cada subtrecho. Considerou-se uma equação específica para os diferentes pontos da bacia de deflexão, a fim de melhor representá-la. O modelo adotado para definir a correlação foi obtido por uma linha de tendência de regressão linear ($FWD = b \cdot vb + a$),

conforme elaborado por Pinto (1991). As equações são apresentadas nas Tabela 4.15, Tabela 4.16 e Tabela 4.17, para os trechos T1, T2 e T3, respectivamente, cujo R² das equações obtidas, em geral, apresentaram bons resultados.

Tabela 4-15 – Equações da correlação do Trecho T1.

Trecho	Equação Linear	R²
D0	FWD = 0,1457.vb+ 14,852	0,9687
D20	FWD = 0,2632.vb + 6,862	0,7417
D30	FWD = 0,1452.vb + 8,1296	0,9003
D45	FWD = 0,2059.vb + 3,929	0,9528
D60	FWD = 0,1519.vb + 4,3827	0,7249
D90	FWD = 0,1890.vb + 2,769	0,8171
D120	FWD = 0,1712.vb + 0,9912	0,8414

Tabela 4-16 – Equações da correlação do Trecho T2.

Trecho	Equação Linear	R²
D0	FWD = 0,4716.vb + 8,2631	0,6631
D20	FWD = 0,3680.vb + 3,4900	0,5977
D30	FWD = 0,2954.vb + 1,4936	0,8288
D45	FWD = 0,4828.vb - 10,516	0,9337
D60	FWD = 0,2485.vb + 2,0429	0,4880
D90	FWD = 0,2291.vb + 0,5748	0,9738
D120	FWD = -0,0216.vb + 2,7713	0,6443

Tabela 4-17 – Equações da correlação do Trecho T3.

Trecho	Equação Linear	R²
D0	FWD =0,3467.vb + 24,824	0,7018
D20	FWD = 0,1746.vb + 18,994	0,7641
D30	FWD =0,0686.vb + 16,703	0,5449
D45	FWD = 0,0645.vb + 11,512	0,6728
D60	FWD =0,1188.vb + 5,9547	0,9194
D90	FWD = 0,0715.vb + 5,6097	0,9415
D120	FWD = 0,0060.vb + 2,4101	0,8302

Dessa forma, uma vez determinadas as equações para transformação das leituras de Viga Benkelman em FWD, foram obtidas as bacias deflectométricas médias dos três trechos experimentais, apresentadas na Figura 4.19.

Por meio do gráfico, é possível perceber, como já indicado anteriormente, as significativas deflexões superiores dos trechos T2 e T3 quando comparado ao trecho T1, este que conta com a solução original de projeto.

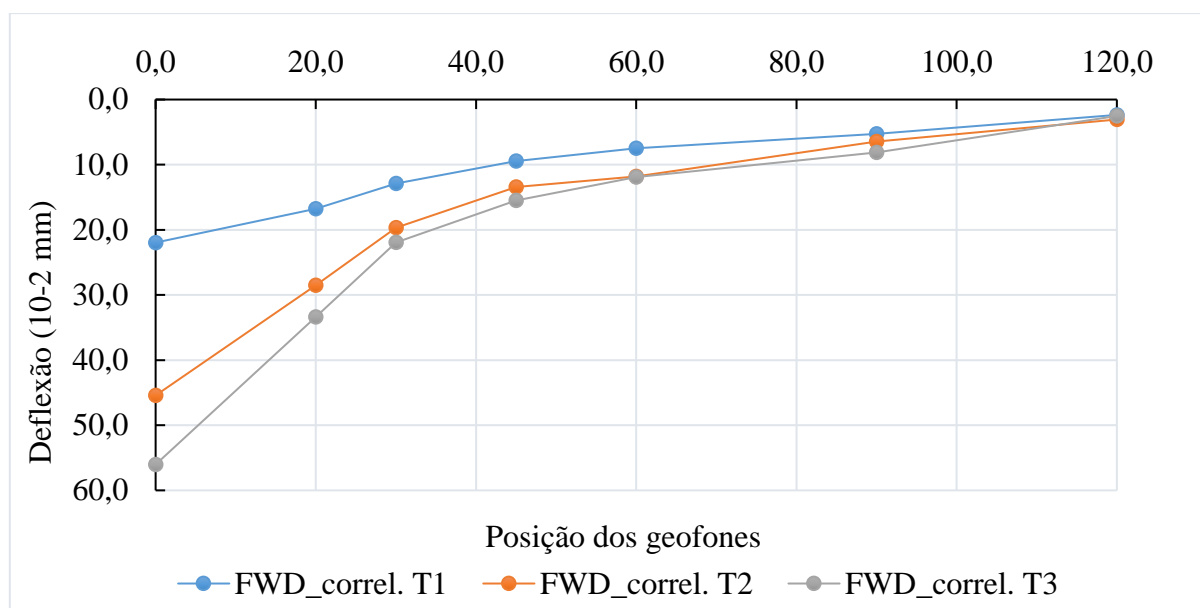


Figura 4-19 – Bacias deflectométricas transformadas de Viga para o FWD do dia 30/05/2022.

4.3. RETROANÁLISE

Tendo sido as bacias deflectométricas corrigidas, foi possível realizar a retroanálise dos segmentos experimentais para obtenção do módulo de resiliência em campo, utilizando o programa BackMeDiNa. Este procedimento mostrou-se útil tanto para a comparação com o resultado obtido em laboratório, quanto para comparação entre a leitura das bacias deflectométricas obtidas no dia 22/02/2022 e a leitura do dia 30/05/2022, esta cujas bacias foram obtidas por meio de correlações.

Inicialmente, as análises versaram sobre o T1, apresentando-se, na Tabela 4.18, as bacias de todas as estacas em conjunto da média e o desvio padrão do levantamento realizado no dia 22/02/2022. A Tabela 4.19 apresenta os mesmos dados, porém para a leitura transformada do dia 30/05/2022.

Tabela 4-18 – Deflexões Trecho T1 – 22/02/2022.

Bacia	Estaca	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
1	407 + 874	22,8	16,6	12,7	10,1	8,3	6,0	2,6
2	407 + 864	22,5	16,1	12,8	10,3	8,5	6,2	3,4
3	407 + 854	25,9	19,0	13,8	11,0	8,8	6,1	2,1
4	407 + 844	31,9	22,2	15,6	12,0	9,8	6,5	2,3
5	407 + 834	32,3	22,8	16,3	12,9	10,4	7,9	2,5
MÉDIA		27,1	19,3	14,2	11,3	9,2	6,5	2,6
MÉDIA + DP ¹		31,9	22,4	15,9	12,4	10,1	7,3	3,1
MÉDIA - DP ¹		22,3	16,2	12,6	10,1	8,3	5,8	2,1

¹Desvio Padrão

Tabela 4-19 – Deflexões Trecho T1 – 30/05/2022

Bacia	Estaca	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
1	407 + 874	22,7	17,4	13,6	10,1	8,0	6,2	2,7
2	407 + 864	20,7	14,8	11,6	8,0	6,5	4,3	2,0
3	407 + 854	22,4	17,4	13,1	9,7	7,4	5,0	2,4
4	407 + 844	21,6	15,8	12,5	8,9	7,1	5,0	2,4
5	407 + 834	22,4	18,4	13,6	10,5	8,3	5,8	2,4
MÉDIA		22,0	16,8	12,9	9,4	7,5	5,3	2,4
MÉDIA + DP ¹		22,8	18,2	13,8	10,4	8,2	6,0	2,6
MÉDIA – DP ¹		21,1	15,3	12,0	8,5	6,8	4,5	2,1

¹Desvio Padrão

De posse dos valores das bacias deflectométricas, foi definida a estrutura a ser considerada na retroanálise. Na primeira análise, foi permitido que todos os módulos das camadas fossem livres para cálculos de iteração. No entanto, o programa retorna valores irrealistas de módulo de resiliência para o revestimento asfáltico.

Nesse sentido, no intuito de obter valores mais coerentes, foi feita outra análise. Optou-se por fixar o valor de módulo de camada de revestimento, considerando a camada de revestimento asfáltico aderida com a base e a camada de base com o subleito não aderida, a qual entende-se ser a situação de aderência mais próxima da condição *in situ*. Para as demais camadas, foi apenas inserida uma estimativa inicial de valores (módulos semente), mas sem fixá-los.

Inicialmente, o sistema de camadas do trecho experimental foi analisado sob a condição não aderida para todas as interfaces do pavimento (revestimento-base; base-subleito). Entretanto, após a extração do corpo de prova do campo, como indicado na Figura 4.20, pôde-se perceber que, possivelmente, a condição aderida entre a camada de revestimento e a de base representaria melhor o sistema de camadas. Soma-se a esse entendimento o fato de que, para a condição não aderida, os módulos de resiliência retroanalisados foram superiores àqueles obtidos para a condição aderida, sendo este último caso um resultado mais próximo do observado em laboratório. Portanto, para as análises realizadas com o BackMeDiNa, adotou-se a condição aderida entre a camada de revestimento e base. Ainda, para a interface da base e do subleito, a condição não aderida foi adotada, uma vez que as análises se aproximaram mais do resultado observado em laboratório.



Figura 4-20 – Corpo de prova extraído do campo com indicação da interface entre o revestimento asfáltico e a base.

Este é um aspecto importante pois, apesar do BackMeDiNa aceitar a aderência entre essas duas camadas (revestimento e base de solo ou material granular), no MeDiNa não se admite tal condição, devido às considerações dos cálculos para a definição da Função de Transferência, em que a interface destas camadas é não aderida. Isto mostra a particularidade do pavimento com base de mistura reciclada estabilizada com espuma de asfalto, que deve ser considerada quando houver trechos suficientes para a proposição de uma FT para este tipo de pavimento.

Assim, diante das considerações supracitadas, a Tabela 4.20 apresenta a configuração inserida no *software* para a execução da retroanálise.

Tabela 4-20 – Configuração inicial das camadas para retroanálise para o T1.

Camada	Material	Espessura (cm)	Módulo (MPa)	Coef. Poisson	Aderência
1	Camadas Asfálticas	5	9773	0,30	Aderido
2	Camadas Granulares	32	400	0,40	Não Aderido
3	Subleito	0	200	0,45	-

Definida a configuração da estrutura do pavimento, foi possível a realização das retroanálises, utilizando-se as deflexões médias de cada levantamento, cujos resultados obtidos estão indicados na Tabela 4.21.

Tabela 4-21 – Retroanálise das bacias do dia 22/02 e do dia 30/05 para o T1.

Estrutura	Bacia 22/02	Bacia 30/05
Revestimento	9733	9773
Base de Espuma	537	690
Subleito Solo Argiloso	275	314
Erro	17,3%	14,0%

O erro indicando no programa para os resultados obtidos é alto, ultrapassando o que seria considerando razoável pela metodologia, sendo da ordem de 10%. Contudo, apesar disso, percebe-se a tendência de comportamento esperada para este tipo de pavimento. O primeiro ponto a ser observado é com relação ao aumento do módulo da camada de base com espuma de asfalto, o que vai ao encontro do esperado diante da redução das deflexões. O módulo apresentou um aumento da ordem de 150 MPa, valor considerado relevante para o prazo de 3 meses, que é o período entre os levantamentos realizados.

Além disso, percebe-se também que o resultado de módulo obtido por meio de retroanálise para a primeira bacia (dia 22/02) é um maior que o resultado de laboratório, considerando a cura seca à 40°C, durante 7 dias (423,7 MPa).

Acredita-se que a não aproximação dos resultados de ensaio de laboratório quando comparado ao estudo da retroanálise em campo esteja relacionada à consideração do tempo de cura do material, em laboratório, mas não se resume a isso. Ainda não é possível relacionar um determinado tempo de cura a um determinado período de construção do pavimento. Logo, entende-se que a consideração de cura em laboratório não foi capaz de representar o estágio avançado de consolidação que o pavimento se encontra, o que justificaria valores maiores em campo.

Por fim, vale ainda destacar o método de compactação adotado. As normas utilizadas para a determinação do módulo de resiliência de deformação permanente adotadas no MeDiNa, com o molde tripartido, não são aqueles usuais para a espuma de asfalto, o que pode ter causado interferências nos resultados.

Após as análises realizadas para o trecho T1, os procedimentos foram executados da mesma forma para os trechos T2 e T3. Para o trecho T2, a configuração no BackMeDiNa manteve-se a mesma do trecho T1, com exceção da espessura da camada de base, a qual foi reduzida de 32 para 15 cm. Por sua vez, com relação ao trecho T3, além da redução da espessura da camada de base, também foi modificado o revestimento asfáltico, sendo substituído pela mistura de gap-graded na espessura de 2,8 cm.

A Tabela 4.22 e a Tabela 4.23 apresentam, respectivamente, as bacias de deflexão do FWD no dia 22/02/2022 e o FWD (obtido pela correlação) no dia 30/05/2022.

Tabela 4-22 – Deflexões Trecho T2 – 22/02/2022.

Bacia	Estaca	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
1	407 + 874	44,5	29,1	19,6	14,1	10,9	6,9	2,4
2	407 + 864	38,7	26,1	18,1	13,2	10,3	7,1	2,4
3	407 + 854	34,4	23,7	16,5	12,7	10,0	6,8	2,4
4	407 + 844	52,0	34,7	22,9	16,5	12,4	7,9	2,5
5	407 + 834	55,7	35,2	22,9	16,2	12,3	8,1	2,5
MÉDIA		45,1	29,8	20,0	14,5	11,2	7,3	2,4
MÉDIA + DP¹		54,0	34,9	22,8	16,3	12,3	8,0	2,5
MÉDIA – DP¹		36,2	24,6	17,2	12,8	10,1	6,7	2,4

¹Desvio Padrão

Tabela 4-23 – Deflexões Trecho T2 – 30/05/2022.

Bacia	Estaca	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
1	407 + 874	40,3	24,1	17,4	10,7	10,5	5,6	3,1
2	407 + 864	41,3	25,6	17,4	9,8	10,0	6,1	3,0
3	407 + 854	50,7	33,7	23,4	17,5	14,5	7,9	3,2
4	407 + 844	52,6	32,9	23,4	18,5	14,0	7,4	3,1
5	407 + 834	42,2	26,3	16,9	10,7	10,0	5,2	3,0
MÉDIA		45,4	28,5	19,7	13,4	11,8	6,4	3,1
MÉDIA + DP¹		51,2	33,0	23,0	17,6	14,0	7,6	3,1
MÉDIA – DP¹		39,7	24,1	16,3	9,3	9,5	5,3	3,0

¹Desvio Padrão

Considerando a estrutura do trecho experimental T2, foi utilizado, novamente, o BackMeDiNa para realização da retroanálise. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.24.

Tabela 4-24 – Retroanálise das bacias do dia 22/02 e do dia 30/05 para o T2.

Estrutura	Bacia 22/02	Bacia 30/05
Revestimento	9500	9773
Base de Espuma	309	438
Subleito Solo Argiloso	250	211
Erro	26,8%	15,8%

Mais uma vez, os erros apresentados na retroanálise foram grandes, em especial para o trecho T2. Em razão disso, a análise dos resultados e uma possível comparação fica prejudicada. Percebe-se, entretanto, que houve um aumento do módulo de resiliência da camada de espuma de asfalto, ainda que o trecho esteja subdimensionado e não tenha ocorrido a redução das deflexões.

A camada de base não foi suficiente para a dissipação das tensões promovidas pelo tráfego, acarretando uma carga maior sobre o subleito. Porém, mesmo com o dano gradativo acima da camada de subleito, houve uma compensação na estrutura do pavimento, em razão do ganho de rigidez da camada de base.

Além disso, percebe-se que a camada de base apresentou um bom comportamento, tendo em vista que houve apenas uma sutil tendência de aumento das deflexões, ainda que a camada possua menos da metade da espessura do dimensionamento original, somando-se, ainda, à ausência de trincamento, mostrando que sua característica de material ligado de forma não contínua permaneceu.

Por fim, o procedimento foi realizado de forma semelhante para o trecho T3, cujas bacias de deflexão do FWD no dia 22/02/2022 e o FWD (obtido pela correlação) no dia 30/05/2022 são apresentadas na Tabela 4.25 e Tabela 4.26, respectivamente.

Tabela 4-25 – Deflexões Trecho T3 – 22/02/2022.

Bacia	Estaca	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
1	407 + 874	56,5	33,9	22,2	15,3	11,5	7,7	2,6
2	407 + 864	56,5	32,8	21,1	14,8	11,1	7,4	2,5
3	407 + 854	62,6	36,5	23,3	15,9	12,0	8,4	2,5
4	407 + 844	51,1	31,6	21,1	15,1	11,6	8,1	2,7
5	407 + 834	74,7	38,0	22,6	16,9	13,0	9,2	2,6
MÉDIA		60,3	34,5	22,1	15,6	11,8	8,2	2,6
MÉDIA + DP ¹		69,3	37,2	23,0	16,4	12,6	8,9	2,7
MÉDIA – DP ¹		51,2	31,9	21,1	14,8	11,1	7,5	2,5

¹Desvio Padrão

Tabela 4-26 – Deflexões Trecho T3 – 30/05/2022.

Bacia	Estaca	(0 cm)	(20 cm)	(30 cm)	(45 cm)	(60 cm)	(90 cm)	(120 cm)
1	407 + 874	57,4	34,4	22,2	15,8	12,1	8,2	2,5
2	407 + 864	54,6	32,6	21,6	15,3	11,9	8,2	2,5
3	407 + 854	53,9	32,3	21,4	15,1	11,4	7,9	2,5
4	407 + 844	55,3	33,0	21,8	15,4	11,4	7,8	2,5
5	407 + 834	58,8	34,7	22,6	16,0	12,6	8,5	2,6
MÉDIA		56,0	33,4	21,9	15,5	11,9	8,1	2,5
MÉDIA + DP ¹		58,0	34,5	22,4	15,9	12,4	8,4	2,5
MÉDIA – DP ¹		54,0	32,3	21,4	15,1	11,4	7,8	2,5

¹Desvio Padrão

Considerando a estrutura do trecho experimental T3, foi utilizado, novamente, o BackMeDiNa para realização da retroanálise. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.27.

Tabela 4-27 – Retroanálise das bacias do dia 22/02 e do dia 30/05 para o T3.

Estrutura	Bacia 22/02	Bacia 30/05
Revestimento	3696	3696
Base de Espuma	344	394
Subleito Solo Argiloso	225	225
Erro	28,5%	29,4%

Ao tempo de defesa desta dissertação, não foram obtidos os resultados dos ensaios realizados na mistura de gap-graded. Portanto, apenas para os fins da retroanálise do trecho T3, foram utilizados resultados de ensaio da literatura que empregaram o ligante CAP 50/70 e agregados graníticos do estado de São Paulo, local onde foram construídos os trechos experimentais. Portanto, foi adotado o valor de 3696 MPa para o módulo de resiliência da mistura de gap-graded, à 25°C, com base em relatório elaborado pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária Nova Dutra, do Grupo CCR (Relatório nº CCR-ND-MOD- RF-MAR/2018).

Para o último trecho, as análises retornaram erros maiores ainda. Isto tanto para as deflexões lidas diretamente com o FWD, quanto para aquelas correlacionadas, indicando não se tratar de um problema causado pela transformação de Viga Benkelman em FWD. Ademais, apesar do erro, a percepção de aumento do módulo da camada de mistura estabilizada com espuma de asfalto continuou, podendo corroborar com o entendimento adotado para o T2. Evidentemente, em razão dos altos erros, não cabe realizar uma análise quantitativa desse aumento.

4.4. ANÁLISE COM O MEDINA

Apesar do programa MeDiNa não ter sido calibrado considerando o tipo de solução estudada nesta pesquisa, este foi utilizado para comparar os resultados de campo com a previsão de danos apresentada pelo programa, a qual é feita por meio da porcentagem de área trincada e pelo afundamento de trilha de rodas previstos até o fim de sua vida útil. Soma-se isso o fato de que, pelos resultados dos ensaios laboratoriais, pôde-se perceber que a mistura reciclada estabilizada com espuma de asfalto possui um comportamento semelhante ao de um material granular, podendo ser avaliada pelos ensaios previstos pelo programa, permitindo o cadastro dos modelos obtidos no *software*.

Dessa forma, para o material do subleito e da base, foram cadastrados os resultados dos modelos obtidos para a deformação permanente e para o módulo de resiliência. Para o concreto asfáltico, como visto, foi possível realizar apenas o ensaio de módulo de resiliência. Portanto, para este caso, dentre as quatro classes sugeridas pelo programa para as misturas asfálticas, foi escolhida aquela que se aproximasse mais do resultado de MR obtido em laboratório, para a mistura

estudada. Assim, apenas para as análises aqui propostas, foi escolhida uma mistura de Classe 4, conforme apresentado na Figura 4.21, para o trecho T1, considerando uma via do Sistema Arterial Primário, com nível de confiabilidade de 85%. Quanto ao tráfego, foi utilizado aquele definido na fase de projeto, onde foi calculado o Número N esperado ao final de 10 anos.

RESPONSÁVEL:	Lara Cordeiro	EMPRESA:	Universidade de Brasília		
PROJETO:	Rodovia SP-270 - Trecho Experimental 1	MODO:	Pavimento Novo (Nível A)		
Alterar Estrutura >>					
CAMADA	DESCRIÇÃO DO MATERIAL	TIPO	ESPESSURA (cm)	MÓDULO (MPa)	COEFICIENTE DE POISSON
>> 1 <<	CONCRETO ASFÁLTICO	Classe 4	5	10492	0,30
2	MATERIAL GRANULAR	Mistura Estabilizada c/ Espuma	32,0	Resiliente Não Linear	0,35
SL	SUBLEITO	Argila arenosa	0,0	Resiliente Não Linear	0,45

Figura 4-21 – Estrutura adotada no MeDiNa.

Ao solicitar que o programa avaliasse a estrutura proposta, os resultados retornaram um pavimento completamente rompido (99%) após 3 anos de vida útil, tendo atingido o limite de 30% considerado no MeDiNa com basicamente 12 meses, conforme apresenta a Figura 4.22.

Evolução dos danos no pavimento			
Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	5,919e+05	3,16%	6,1
6	3,577e+06	11,75%	7,7
12	7,216e+06	29,51%	8,4
18	1,092e+07	54,53%	8,9
24	1,468e+07	79,54%	9,2
30	1,852e+07	98,00%	9,5
36	2,241e+07	99,00%	9,7
42	2,638e+07	99,00%	9,9
48	3,042e+07	99,00%	10,1
54	3,452e+07	99,00%	10,3
60	3,870e+07	99,00%	10,4
66	4,294e+07	99,00%	10,6
72	4,727e+07	99,00%	10,7
78	5,166e+07	99,00%	10,8
84	5,614e+07	99,00%	11,0
90	6,069e+07	99,00%	11,1
96	6,532e+07	99,00%	11,2
102	7,003e+07	99,00%	11,3
108	7,482e+07	99,00%	11,4
114	7,969e+07	99,00%	11,5
120	8,465e+07	99,00%	11,6

Figura 4-22 – Evolução da área trincada e do ATR no T1.

Quanto ao afundamento de trilha de rodas, a previsão é que o pavimento não atinja o limite máximo em nenhum momento, apresentando um máximo de 11,6 mm após 10 anos, sendo a maior parcela de contribuição deste afundamento advinda da camada de base estabilizada com espuma de asfalto, conforme mostra a Figura 4.23.

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	8,10
3	SUBLEITO	3,46
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		11,6

Figura 4-23 – Análise do ATR por camada do T1.

Pelos resultados apresentados, é possível inferir que a previsão do MeDiNa não correspondeu à evolução de danos observada no pavimento com relação à área trincada. De acordo com o programa, em 6 meses, o pavimento apresentaria 11,75% de área trincada, entretanto, os trechos experimentais, mesmo o T2 e o T3 que estão subdimensionados, ainda não apresentam nenhum trincamento.

Para o afundamento de trilha de rodas, o programa também não se mostrou muito assertivo, o que também era esperado, em razão da ausência de uma calibração específica. Para o T1, de acordo com o levantamento de campo, no período de 6 meses, o trecho apresentou aproximadamente 4 mm, e de acordo com a previsão do MeDiNa, era esperado 7,7 mm de ATR. Entretanto, é possível identificar por esse resultado o fato de que a maior parte do afundamento foi causada pela mistura estabilizada com espuma de asfalto, o que vai ao encontro do esperado, visto que para esse tipo de mistura, o ATR é um dos critérios mais críticos, resultante da consolidação do material, correspondente ao seu ganho de rigidez. Por meio da Figura 4.23, foi possível perceber que 70% do ATR foi causado pela camada de base estabilizada.

Destaca-se, que o MeDiNa, para o ATR, não considera a contribuição do revestimento asfáltico. Dessa forma, é considerada apenas a deformação causada pela mistura reciclada estabilizada com espuma de asfalto e pelo subleito. De toda forma, há outros aspectos inerentes a esta avaliação, junto à falta de calibração, que é o período ideal de cura da mistura estabilizada para a avaliação do material em programas de dimensionamento. Ainda não está definido qual seria o período e a temperatura de cura ideais para representar a mistura em campo da melhor forma.

Quanto à previsão de área trincada, apesar do programa não ter previsto de forma acertada em relação ao campo, entende-se também que não era esperada tal conformidade. Primeiro, como já mencionado, a solução não fez parte da calibração do programa, uma vez que este tipo de solução apresenta particularidades de comportamento que não foram contempladas nos Trechos Experimentais que deram origem à Função de Transferência (FT).

Em segundo lugar, para a área trincada, a solução empregada na camada apresenta um comportamento diferenciado, tendo em vista tratar-se de um material ligado de maneira não contínua, onde as trincas não se propagam como em materiais granulares convencionais. De acordo com Bonfim (2021), a tensão de cisalhamento na ponta da trinca é dissipada quando atinge um ponto onde não há ligação entre os agregados, logo, não se espera um trincamento precoce no pavimento, o que, provavelmente, seria observado caso fossem contempladas, na calibração, este tipo de solução. A Figura 4.24 apresenta, de forma gráfica, para o T1, a evolução dos defeitos de área trincada e afundamento de trilha de rodas em comparação com os danos previstos pelo MeDiNa.

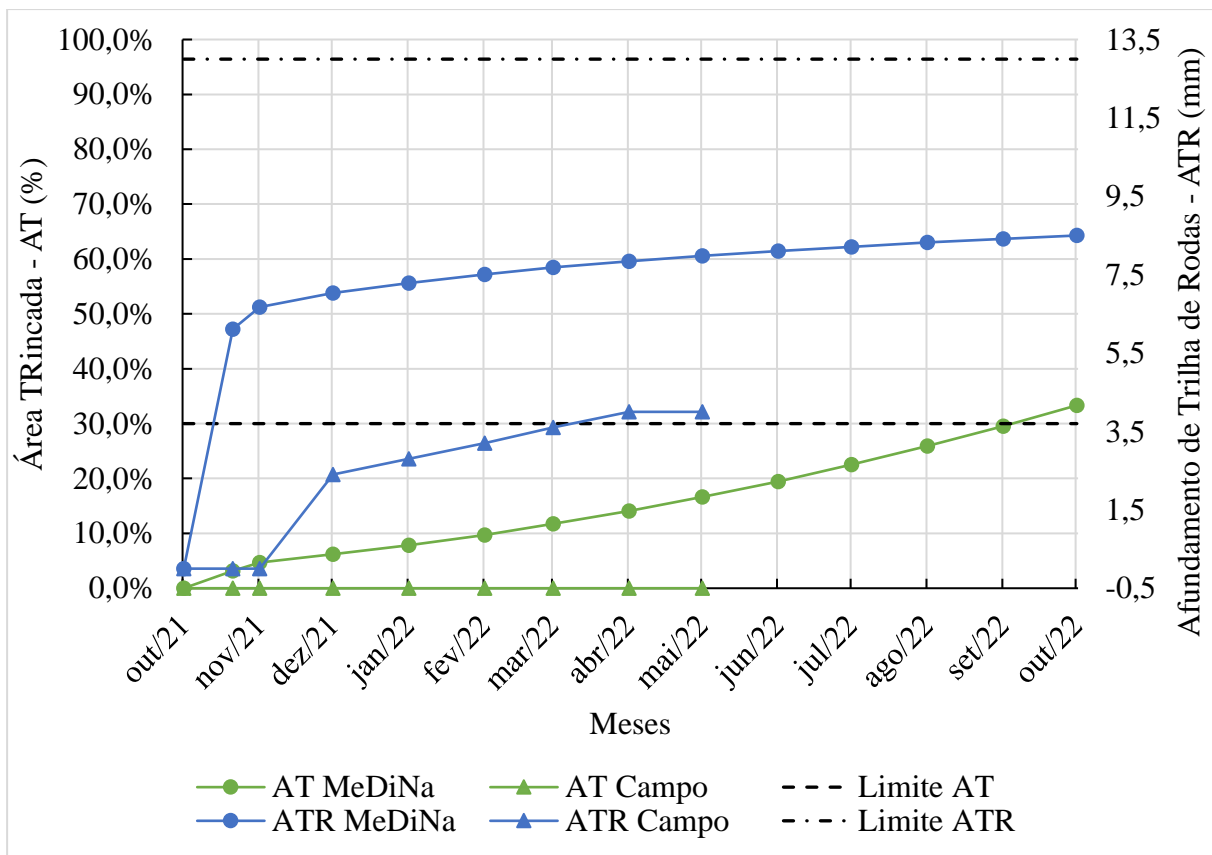


Figura 4-24 – Comparação de dados de campo e previsão do MeDiNa para o T1.

Para o trecho T2, as análises forneceram resultados semelhantes ao T1. Entretanto, para o afundamento de trilha de rodas, resultou em uma deformação ligeiramente inferior ao trecho T1. Porém, diferentemente do T1, a maior parcela de contribuição deste afundamento veio do subleito, tendo em vista que a camada de base é esbelta, como mostra os resultados indicados na Figura 4.25.

Análise de Afundamento de Trilha de Roda

Cam	Material	Afundamento de Trilha de Roda (mm)
1	CONCRETO ASFÁLTICO	0,00
2	MATERIAL GRANULAR	5,03
3	SUBLEITO	5,90 *
Afundamento de Trilha de Roda (mm)		10,9

* O Afundamento de Trilha de Roda ultrapassou o limites de 5% da espessura da camada ou 5mm de profundidade do subleito

Figura 4-25 – Análise do ATR por camada do T2.

No trecho T2, de acordo com o MeDiNa, os 15 cm da camada de base estabilizada com espuma de asfalto, assim como no T1, não foram suficientes para dissipação das tensões promovidas pelo tráfego e, em razão disso, o carregamento aplicado no conjunto de camadas provocou uma contribuição mais significativa do subleito na deformação das camadas.

Comparando aos resultados observados em campo, para os trechos T1 e T2, o afundamento medido foi muito próximo, mas ainda sutilmente maior para o trecho T2, em razão da contribuição mais significativa do subleito. Novamente, confrontando os resultados campo e laboratório, não houve igualdade, uma vez que a previsão do MeDiNa era de que, no período de 6 meses, o pavimento apresentasse 7,5 mm de ATR, como observado na Figura 4.26, mas em campo, com 6 meses de avaliação, o pavimento apresentou apenas 5,2 mm, em média, de ATR.

Evolução dos danos no pavimento

Mês	N Equiv	Área Trincada	ATR (mm)
1	5,919e+05	3,19%	6,1
6	3,577e+06	12,01%	7,5
12	7,216e+06	30,38%	8,2
18	1,092e+07	56,05%	8,6
24	1,468e+07	81,24%	8,9
30	1,852e+07	99,00%	9,1
36	2,241e+07	99,00%	9,3
42	2,638e+07	99,00%	9,5
48	3,042e+07	99,00%	9,7
54	3,452e+07	99,00%	9,8
60	3,870e+07	99,00%	10,0
66	4,294e+07	99,00%	10,1
72	4,727e+07	99,00%	10,2
78	5,166e+07	99,00%	10,3
84	5,614e+07	99,00%	10,4
90	6,069e+07	99,00%	10,5
96	6,532e+07	99,00%	10,6
102	7,003e+07	99,00%	10,7
108	7,482e+07	99,00%	10,8
114	7,969e+07	99,00%	10,8
120	8,465e+07	99,00%	10,9

Figura 4-26 – Evolução da área trincada e do ATR no T2.

Quanto à área trincada, a evolução de danos foi basicamente a mesma do T1, ou seja, para o programa, a espessura da camada não implicou em relevantes modificações no dimensionamento. Entretanto, pelo monitoramento de campo realizado no T2, mesmo subdimensionado, não foi observado trincamento no período de avaliação do trecho experimental, sendo também constatado um ATR maior do que o T1, indo contra a previsão do MeDiNa.

A Figura 4.27 apresenta, de forma gráfica, para o T2, a evolução dos defeitos de área trincada e afundamento de trilha de rodas em comparação com os danos previstos pelo MeDiNa.

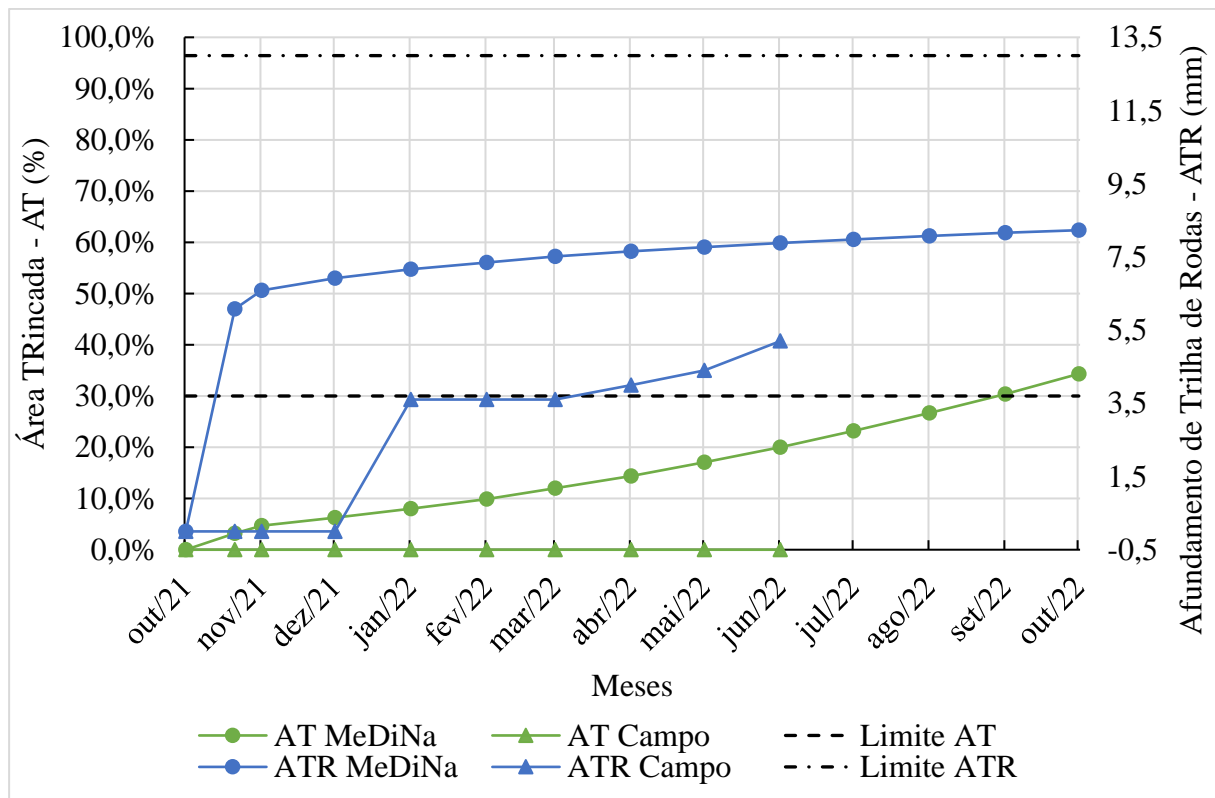


Figura 4-27 – Comparação de dados de campo e previsão do MeDiNa para o T2.

A avaliação com o MeDiNa foi realizada apenas para os trechos T1 e T2, pois o trecho T3 contou com apenas 2,8 cm de revestimento asfáltico, mas o MeDiNa exige, no mínimo, que a camada tenha 5 cm de espessura. Logo, não foi possível avaliar a previsão da evolução de danos para esse trecho.

5 CONCLUSÕES

O ciclo de vida dos pavimentos rodoviários envolve ensaios, projetos, produção de materiais, construção, operação, manutenção, restauração e disposição final de resíduos ao final da vida útil. Nas obras de restauração, recuperação ou reconstrução dos pavimentos, normalmente são realizadas remoções das camadas por meio de fresagem, gerando um material que pode ser aproveitado, mas que muitas vezes é descartado. A opção de aproveitamento do fresado tem grande importância, principalmente do ponto de vista ambiental, pois gera um ciclo de reutilização de materiais, evitando descartes inapropriados e reduzindo o uso de recursos naturais e do consumo de energia.

Nesse sentido, buscando avaliar o desempenho de soluções sustentáveis de pavimentos, nas quais o fresado é utilizado na camada de base estabilizada com espuma de asfalto, foi implantado um Trecho Experimental composto por três subtrechos com diferentes estruturas de pavimento, tendo em comum a camada de base mencionada e a de subleito. Os três subtrechos contaram com a camada de base de mistura reciclada estabilizada, sendo reduzidas as espessuras dessa camada para os trechos T2 e T3 (15 cm), quando comparadas ao trecho T1 (32 cm), que corresponde à solução original de restauração de pavimento da rodovia.

Para compreender o comportamento do trecho em estudo, foi estabelecido um programa de monitoramento das condições funcional e estrutural, cujas informações foram confrontadas com a ação dos agentes externos (clima e tráfego) e com resultados de ensaios laboratoriais. Tendo em vista métodos de dimensionamento mecânico-empíricos, foram realizados ensaios para obtenção de parâmetros que levam em consideração as tensões e deformações resultantes de carregamento cíclico.

No que se refere às atividades de campo, foram apresentados os métodos empregados para a avaliação do desempenho do trecho experimental e os resultados dos primeiros seis meses das campanhas de monitoramento das bacias de deflexão, afundamento em trilha de roda e avaliação da condição de superfície, em particular o trincamento. Os materiais das camadas do pavimento dos três subtrechos foram avaliados por meio de ensaios laboratoriais solicitados nos métodos de dimensionamentos mecânico-empíricos, com destaque para o Método de Dimensionamento Nacional – MeDiNa, em que a deformação permanente e o módulo de resiliência dos materiais do subleito e da base foram avaliados por meio dos ensaios triaxiais

de carga repetida. Além disso, em razão do processo de estabilização, o material da camada de base foi avaliado para diferentes períodos de cura. Por fim, no revestimento asfáltico também foi realizado o ensaio de módulo de resiliência.

Exceto pela ausência dos ensaios para determinação do *Flow Number* e da fadiga do revestimento asfáltico, foram executados todos os ensaios previstos no Guia PRO-MeDiNa. Os ensaios faltantes encontram-se em andamento, e não puderam ser concluídos a tempo para defesa desta dissertação. Contudo, eles serão analisados e publicados em outra oportunidade, visando permitir a construção da base de dados necessária para realização de estudos de proposição de Função de Transferência no MeDiNa para esse tipo de pavimento.

Portanto, com relação às principais conclusões observadas nos estudos realizados nesta pesquisa, destacam-se:

- Foi verificada uma tendência da redução da deflexão para o trecho T1 devido ao aumento do módulo de resiliência da base *in situ*, conforme resultados das retroanálises indicaram. O comportamento do T1 aproximou-se mais do esperado, em que há uma redução das deflexões com o passar do tempo, tendo em vista o aumento da rigidez da camada de base, decorrente da consolidação da mistura estabilizada com espuma de asfalto. O tempo de cura da estabilização também é outro aspecto que pode ser considerado, no entanto, as contribuições da consolidação e da cura no ganho de rigidez *in situ* não foram possíveis de serem mensuradas.
- Para os trechos T2 e T3, em contrapartida, as bacias deflectométricas apresentaram sutil tendência de aumento da deflexão máxima, indicando que as rigidezes das camadas ou parte das camadas poderia estar reduzindo. A camada de base estabilizada, devido à sua espessura frente às propriedades do material e do tráfego, foi concebida justamente para aceleração dos danos no pavimento e, como observado, os 15 cm não foram suficientes para dissipação das tensões promovidas pelo tráfego a níveis de valores aceitáveis para a camada subjacente, o subleito. Assim, mesmo com o ganho de rigidez da mistura estabilizada com espuma de asfalto, a qual foi observada pelas retroanálises das bacias de deflexão monitoradas, verifica-se uma queda na condição estrutural do pavimento. Mesmo com o gradativo dano na camada de subleito, houve uma compensação na estrutura do pavimento, devido ao ganho de rigidez da base, conforme indicado nas retroanálises. Caso contrário, as deflexões seriam muito mais altas e o que se observa é quase uma tendência de manutenção da deflexão ao longo do tempo. Em função da

maior espessura da camada de base do T1 (32 cm), a bacia de deflexão correspondente à resposta tensão-deformação ao carregamento aplicado no conjunto de camadas teve uma contribuição mais significativa da mistura estabilizada com espuma asfalto, observando, portanto, a redução da deflexão.

- Nas leituras dos primeiros dois meses de liberação do tráfego, não houve ocorrência de afundamento de trilha de rodas. Após esse período, o defeito foi contabilizado, aumentando em uma taxa relativamente alta para o período em análise. Os trechos T1 e T2 alcançaram 4 e 5 mm, respectivamente, após 6 meses de vida útil. Já o trecho T3 apresentou uma deformação muito significativa, maior que 8 mm. De fato, era esperado um maior afundamento para este trecho, uma vez que a camada de revestimento adotada para o segmento foi mais esbelta, tendo como propósito ser uma camada de sacrifício. Entretanto, como discutido, o valor de ATR observado para o T3, pode ser associado à maior deformação no subleito, devido à menor dissipação das tensões pelas camadas sobrejacentes, base e revestimento.
- Os três subtrechos não apresentaram trincamento, corroborando com a literatura ao mencionar que a camada de base reciclada estabilizada com espuma de asfalto trata de um material ligado de forma não contínua, onde as trincas não se propagam como em materiais granulares convencionais. Os resultados iniciais vêm indicando a potencialidade do pavimento sustentável com incorporação de material fresado, em rodovias de tráfegos elevados, como do trecho de rodovia avaliado. Destaca-se, ainda, que mesmo no trecho T3, com uma fina camada de revestimento, não houve surgência de trincas.
- As correlações obtidas entre as deflexões das bacias com a Viga Benkelman (VB) e com o *Falling Weight Deflectometer* (FWD) foram importantes para o estudo, tendo em vista que as retroanálises no BackMeDiNa são elaboradas a partir de bacias deflectométricas obtidas pelo FWD. Como de conhecimento do meio rodoviário, não existe uma correlação única entre as deflexões de VB e FWD que seja capaz de representar todos os pavimentos asfálticos. Logo, não se pode usar as correlações dessa dissertação de forma generalizada. Entretanto, para pavimentos com a mesma estrutura, pode ser viável, como mostraram os resultados obtidos. As correlações se apresentam como uma boa alternativa, devido à facilidade de mobilização de equipe para realizar leituras com VB, sendo capaz, assim, de fornecer meios para acompanhar a evolução da condição

estrutural ao longo do tempo e, com isso, permitir a utilização do BackMeDiNa para verificação da variação dos módulos de resiliência retroanalizados.

- Os estudos de retroanálise das bacias de deflexão mostraram que na interface entre o revestimento asfáltico e a base de mistura estabilizada com espuma de asfalto existe uma condição de aderência. Os módulos de resiliência retroanalizados na condição não aderida se afastaram mais dos valores obtidos nos ensaios, do que aqueles na condição aderida. Testemunhos retirados por sondagens rotativas após meses do pavimento submetido ao tráfego revelaram que existe uma ligação muito forte entre o concreto asfáltico e a mistura estabilizada. Esta verificação é importante, tendo em vista que o dimensionamento pelo MeDiNa não considera que exista aderência entre as camadas asfálticas e as de solos e materiais granulares.
- Em ensaios laboratoriais na mistura estabilizada com espuma de asfalto, foi possível identificar que o material se comporta de forma semelhante a um material granular, sendo dependente, principalmente, da tensão confinante.
- No que se refere ao método de cura da mistura estabilizada com espuma de asfalto, para os ensaios realizados na temperatura de 25°C, o tempo de cura (0 e 7 dias) não importa em diferenças nos resultados, resultando em módulos de resiliência basicamente iguais. Entretanto, para a temperatura de 40°C, a cura de sete dias retornou valores superiores quando comparada à cura de 3 dias, apresentando também valores superiores dos módulos obtidos com a cura na temperatura de 25°C. Portanto, é possível inferir que a temperatura considerada no processo de cura implica diferenças importantes na rigidez do material, da mesma forma que a quantidade de dias de cura.
- Com relação à média de umidade dos corpos de prova, para cada tempo de cura, constatou-se que a umidade remanescente no material abaixou significativamente daquela obtida na compactação do corpo de prova, para os dois tempos de cura na temperatura de 40° C, mais ainda para o método com 7 dias. Em contrapartida, para a temperatura de 25°C com 7 dias de cura, a redução foi baixa, resultando em uma umidade muito similar à cura com 0 dias, o que justifica valores de módulo de resiliência quase iguais. Portanto, percebeu-se que a quantidade de dias (para 40°C) influencia no resultado do módulo de resiliência, e que a realização dos ensaios com o corpo de prova à temperatura de 25°C pode vir a causar subdimensionamentos.

- A depender do período de cura da mistura estabilizada com espuma de asfalto, ela pode ter um comportamento relacionado à rigidez (consolidação) mais avançado ou ainda precoce. Portanto, entender qual o melhor modelo para representar esse material no dimensionamento de pavimentos ainda se mostra um desafio. Além disso, a cura é afetada pela condição climática, como observado pelo registro das precipitações no período do monitoramento, no qual pode-se observar o desempenho estrutural nas estações chuvosa e seca.
- Quanto ao comportamento referente ao ensaio para determinação da deformação permanente, apesar de ser esperado um material bastante susceptível às deformações plásticas, quando do acúmulo das deformações elásticas, a mistura estabilizada apresentou um bom comportamento, suportando todos os ciclos aos quais foi submetida no ensaio. Ademais, tanto pelos resultados do ensaio, quanto pela análise com o MeDiNa, não atingiu o limite máximo de deformação, não se tratando, portanto, do critério de ruptura de maior impacto no tempo de vida útil do pavimento, em que o trincamento se sobressaiu na previsão, mas não correspondeu ao verificado *in situ*.
- Por fim, com relação ao MeDiNa, a avaliação não apresentou resultados coerentes com o observado em campo, uma vez que este tipo de solução apresenta particularidades de comportamento que não foram contempladas nos Trechos Experimentais que deram origem à Função de Transferência (FT). Apesar dos resultados laboratoriais mostrarem que o material apresenta um comportamento muito semelhante ao de um material granular, ainda precisa ser mais bem avaliado para que o programa possa efetivamente ser utilizado. Essa não representatividade já era de conhecimento prévio à elaboração da dissertação. Entretanto, devido ao potencial da solução, em termos ambientais, decorrentes do aproveitamento do fresado e do seu desempenho frente às solicitações, era necessário iniciar a alimentação de um banco de dados voltado para futuras propostas de FT para esse tipo de pavimento. Nesse sentido, a dissertação contribuiu com 3 Trechos Experimentais, tendo em vista que quase todos os ensaios previstos no MeDiNa foram realizados, exceto aqueles para obtenção do *Flow Number* e da fadiga da mistura asfáltica do revestimento, mas que estão em andamento e serão objeto de publicação.

Diante das principais conclusões apresentadas, entende-se que há um grande potencial para a solução sustentável de pavimentação proposta nesta dissertação. O aproveitamento do fresado junto à solução de espuma de asfalto é capaz de fornecer um material com bom comportamento,

tanto em termos de rigidez da camada, quanto em termos das manifestações das deformações permanentes (ATR) e elásticas (TR). Ao contrário do comum aos diversos tipos de base, há aumento do módulo de resiliência ao longo do tempo. Para o tempo da dissertação, não foi possível observar quando o MR se estabiliza e começa haver sua redução. Para tanto, é extremamente importante a continuidade do monitoramento da deflexão, do trincamento e afundamento de trilha de roda dos subtrechos. Ainda é necessário definir um método de cura ideal para sua avaliação em laboratório. Entretanto, para trechos dimensionados de maneira adequada, mostra-se uma solução em que a taxa de progressão do trincamento ao longo da vida útil é baixa.

5.1. SUGESTÃO DE FUTURAS PESQUISAS

Para trabalhos futuros, em termos de análises laboratoriais, recomenda-se a continuação da avaliação do método de cura que melhor represente o material em campo, fornecendo, assim, subsídios para a utilização do material em dimensionamentos mecanístico-empíricos de pavimentos.

Além disso, sugere-se a montagem de um banco de dados com os resultados de ensaios realizados com esse tipo de solução sustentável de pavimentação, para que, posteriormente, possam ser analisados para fins de proposição de Função de Transferência, no particular para o MeDiNa, tendo em vista que os ensaios foram definidos para esse método.

Quanto ao comportamento de campo, recomenda-se a continuidade das medidas das bacias deflectométricas associando-as ao tráfego e às condições climáticas (precipitações e variações de temperatura), para obtenção de resultados fundamentados em análise de longo prazo, a fim de incrementar e melhorar o fator campo-laboratório. Sugere-se, também, estudos de retroanálise das bacias monitoradas ao longo do tempo, de forma a avaliar a evolução da rigidez da camada de base estabilizada – até quando aumenta, estabiliza e começa a reduzir o módulo de resiliência.

Como os ensaios laboratoriais foram executados para atender métodos mecanicistas, que levam em consideração as análises das tensões e deformações mobilizadas no pavimento pelas ações do tráfego e climáticas, é importante conhecer os valores destas variáveis *in situ*. Por meio de análises comparativas entre as tensões e deformações medidas e previstas, bem como ajustes no modelo numérico, pode-se refinar o método computacional utilizado no dimensionamento do pavimento. Nesse sentido, recomenda-se a implantação de um subtrecho instrumentado com

células de tensão total, *strain gages*, umidostatos, termopares, tensiômetros e pluviógrafos, próximo ao Trecho Experimental, composto pelos mesmos materiais ensaiados. Assim, será possível avaliar a previsibilidade do método *versus* o medido em campo, fornecendo subsídios para o aprimoramento das análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, L. R. (2017). Comparação do comportamento de pavimentos asfálticos com camadas de base granular, tratada com cimento e com estabilizantes asfálticos para tráfego muito pesado. São Paulo: Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Andrade, L. R. D., Vasconcelos, K. L., & Bernucci, L. L. B. (2016). Avaliação do comportamento estrutural de pavimentos por meio de adoção de parâmetros de bacia deflectométrica. In Anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes.
- Andrade, W. M., Soares, J. B., Barroso, S. H. A., Estudo da técnica da reciclagem a frio utilizando espuma de asfalto. Belém, Pará. ANPET, 2013.
- ARRA. Asphalt Recycling and Reclaiming Association (2001). Basic Asphalt Recycling Manual. Annapolis: ARRA, 265p.
- ARRA. Asphalt Reclaiming and Recycling Association (2017). Cold recycling using foamed (expanded) asphalt recycling agent. Glen Ellyn: Annapolis, 10 p.
- Barreta, Ana C.; FORTES, Rita M. Estudo comparativo da utilização de duas tecnologias na reciclagem de pavimento asfáltico com espuma de asfalto para utilização em camada de base. In: Jornada de Iniciação Científica, VII, 2011, São Paulo.
- Bernucci, L. L. B., Motta, L. M. G., Ceratti, J. A. P., et al. (2010) Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. 4. ed., v.1, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA.
- Bessa, I. S., Almeida, L.R., Vasconcelos, K. L., Bernucci, L. L. B. (2016). Design of cold recycled mixes with asphalt emulsion and Portland cement. Canadian Journal of Civil Engineering. NRC Research Press.
- Bonfim, Valmir. Pavimento Sustentável, 1 ed., São Paulo: Exceção Editorial e Eventos, 2021.
- Bueno, L. D. (2016). Avaliação deflectométrica e de rigidez: estudo de caso em três trechos monitorados em Santa Maria/RS.
- CBB Asfaltos. Especificação de Material CAP 50/70. ANP Resolução nº 19, DE 11.07.2015 – Retificação de 17.03.2006.
- Colpo, G. B. (2014). Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos.
- Cunha, C. M. (2010). Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis: diferentes tipos de reciclagem.
- Cunto, F. J. C. (1998). Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: estudo de três solos do nordeste brasileiro (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Delgado, B. G., Guimarães, A. C. R., & da Motta, L. M. G. (2014). A Teoria do Shakedown Aplicada à Pavimentação com Solos Tropicais. In XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica e VII Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia, ABMS: Goiânia, Goiás, Brasil.
- Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo. DER. IP-DEP00/003 – Avaliação funcional e estrutural de pavimento. São Paulo, 2006.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1979). DNER – PRO 010/79. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - procedimento “A”. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1979). DNER – PRO 011/79. Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis - procedimento “B”. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 049/94. Solos – determinação do Índice de Suporte California utilizando amostras não trabalhadas. Rio de Janeiro, RJ.

- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 080/94. Solos - Análise granulométrica por peneiramento. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 082/94. Solos - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 122/94. SOLOS - Determinação do limite de liquidez - Método de referência e método expedito. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 256. Solos compactados em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-ME 258. Solos compactados em equipamento miniatura – mini-MCV. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (1994). DNER-PRO 269/94. Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2003). DNIT 005/2003-TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2003). DNIT 006/2003-PRO. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2003). DNIT 007/2003-PRO. Levantamento para avaliação da condição de superfície de subtrecho homogêneo de rodovias de pavimentos flexíveis e semi-rígidos para gerência de pavimentos e estudos e projetos. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2014). DNIT 169/2014-ES. Pavimentação - Reciclagem de pavimento em usina com espuma de asfalto. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 135/2018-ME. Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas - Determinação do módulo de resiliência. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 136/2018-ME. Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 183/2018-ME. Pavimentação asfáltica - Ensaio de fadiga por compressão diametral à tensão controlada. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 184/2018-ME. Pavimentação - Misturas asfálticas - Ensaio uniaxial de carga repetida para determinação da resistência à deformação permanente. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 134/2018-ME. Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2018). DNIT 179/2018-ME. Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021). DNIT 033/2021-ES.. Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico Reciclado a quente. Brasília, DF.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021). DNIT 433/2021-PRO. Pavimentação – Levantamento Percentual de área trincada e afundamento de trilha de roda de pavimento asfáltico em trechos experimentais, monitorados ou trechos homogêneos de curta extensão – Procedimento. Brasília, DF.

- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (2021). DNIT, Resolução nº 14, de 08 de julho de 2021. Acesso em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/central-de-conteudos/atos-normativos/tipo/resolucoes/resolucao-14-2021-dg-dispoe-sobre-o-reaproveitamento-do-rap-reclaimed-asphalt-pavement.pdf>.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT, Publicação IPR 720. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos - 2. ed. -
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT, Publicação IPR 749. Guia para Execução de Trechos Experimentais – PRO-MeDiNa, 1ª Edição – Brasília - DF. – 2020
- Ebels, L. J., Jenkins, K (2007). Mix Design of Bitumen Stabilized Materials: Best Practice and Considerations for Classification. Proceedings of the 9th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. Gaborone, Botsuana.
- Fontes, L. P. T. L. (2009). Otimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos. Tese (Doutorado) - Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho.
- Fu, P., Jones, D., Harvey, J. T., & Halles, F. A. (2010). Investigation of the curing mechanism of foamed asphalt mixes based on micromechanics principles. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(1), 29.
- Godenzoni, C., Graziani, A., & Perraton, D. (2017). Complex modulus characterisation of cold-recycled mixtures with foamed bitumen and different contents of reclaimed asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 18(1), 130-150.
- Guatimosim, F. V. (2015). Mechanical behaviour and structural performance of recycled foamed bitumen stabilized materials. Thesis (Masters).
- Guatimosim, F. V., Vasconcelos, K., Kuchiishi, A. K., & Bernucci, L. L. B. (2019). Field evaluation of high level roads with foamed bitumen stabilized base layers. In *Airfield and Highway Pavements 2019: Testing and Characterization of Pavement Materials* (pp. 549-559). Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- Guimarães, A. C. (2009). Um método mecanístico-empírico para a previsão da deformação permanente em solos tropicais constituintes de pavimentos. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 367.
- Hómez, J. H. G. (2014). Avaliação de rodovias goianas restauradas com a técnica de reciclagem a frio in situ. Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 171p.
- Huan, Y., Siripun, K., Jitsangiam, P., & Nikraz, H. (2010). A preliminary study on foamed bitumen stabilisation for Western Australian pavements. *Scientific Research and Essays*. Department of Civil Engineering, Curtin University, Australia.
- Jenkins, K. J, Long, F. M., Ebels, L. J, (2007). Foamed bitumen mixes – shear performance *International Journal of Pavement Engineering*. Taylor & Francis. 8:2, 85-98.
- Júnior, V. D. S. B., Kraemer, K. W., de Souza Pereira, R., Baroni, M., & Specht, L. P. (2018). Deformação permanente em misturas asfálticas com diferentes ligantes asfálticos e adição de cal a partir do ensaio uniaxial de carga repetida.
- Kandhal, P. S., & Mallick, R. B. (1997). Pavement recycling guidelines for state and local governments: Participants reference book. Final report, September 1995--December 1997 (No. PB-99-104408/XAB). National Center for Asphalt Technology, Auburn, AL (United States); Federal Highway Administration, Washington, DC (United States).
- Klinsky, L. M. G., de Faria, V. C. Grupo CCR. Centro de Pesquisas Rodoviárias (2018). Determinação do módulo de resiliência, módulo dinâmico e flow number de misturas asfálticas com diversos ligantes asfálticos e faixas granulométricas. Relatório número CCR-ND-MOD- RF-MAR/2018, 241.
- Kuchiishi, A. K. (2019). Mechanical behavior of cold recycled asphalt mixtures (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

- Lima, C. D. A. D., Motta, L. M. G. D., & Aragão, F. T. S. (2021). Ensaio de deformação permanente: efeito do número de ciclos na interpretação do comportamento de solos e britas. *Matéria* (Rio de Janeiro), 26.
- Maia, C. L. (2016). Análise comparativa de módulos de resiliência obtidos com o Geogauge para o controle de qualidade de camadas granulares dos pavimentos.
- Maia, C. L., Silva, C. A. U., Barroso, S. H. (2019) Avaliação do equipamento Geogauge para ser utilizado no controle de qualidade de camadas granulares de pavimentos flexíveis, 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Balneário Camboriú, Santa Catarina.
- Martinez, R. M., Bonfim, V., Paiva, C. E. L. de. (2013). Retroanálisis para Estimar los Módulos de las capas de un Pavimento Reciclado con Espuma de Asfalto, 01/2013, XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Vol. único, pp.205-215, Guatemala.
- Mazzuco, A., Schuster, B. S., Junior, L. R. T., Viotto, H. G. F., & Soares, A. C. V. (2019) O estado da arte da reciclagem de pavimentos asfálticos no Brasil. X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Fortaleza, Ceará.
- Medina, J., Macêdo, J.A.G., Motta, L.M.G., Albernaz, C.A.V. (1994). Utilização de Ensaio Deflectométrico e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos. 28ª Reunião Anual de Pavimentação, Belo Horizonte, MG, v. 1, p. 595-625, 1994.
- Medina, J.; Motta, K. M. G. (2005). *Mecânica dos Pavimentos*. Rio de Janeiro: Editora UFRJ.
- Mendes, J. T. S. (2013). Utilização do Deflectômetro de Impacto Ligeiro, do GeoGauge e do Densímetro Elétrico para o Controle in situ da Qualidade de Materiais em Obras de Pavimentação Rodoviária. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.
- Nóbrega, E. S. (2003). Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos. 2003 (Doctoral dissertation, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil).
- Paula, G. F., Fernandes, P. C., Silva, R. C. (2022). Modelos tensão-deformação e parâmetros de solos tropicais de subleito do Distrito Federal. Universidade de Brasília, DF, Brasília.
- Pinto, S. (1991). Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos. Rio de Janeiro.
- Pipicano, E. F. M., & Vieira, S. S. (2018). Processos utilizados pelo DNIT para coleta de dados necessários para a calibração e aferição do modelo HDM-4 às condições das rodovias brasileiras. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado.
- Ribeiro, M. M. P. (2013). Contribuição ao estudo da deformação permanente dos solos de subleito (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Sant'ana, W. C. (2009). Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de vias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão. Ed rev. São Paulo. 341 p.
- Santos, T. A. (2016). Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 164 p.
- Schreinert, G. G. (2017). Reciclagem de pavimentos com adição de cimento: comportamento mecânico de misturas contendo fresado asfáltico e solo laterítico. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Seyman, E. (2003). Laboratory Evaluation of in-situ tests as potential quality control/quality assurance tools. 186 f. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) - Graduate Faculty of the Louisiana, State University and Agricultural and Mechanical College.
- Silva, V. D. D. (2019). Avaliação da deformação permanente de misturas estabilizadas com asfalto (Tese de doutorado, Universidade de São Paulo).
- Silva, R. C. (2022). Monitoramento e Ensaio de Trecho Experimental de Pavimentos Rodoviários com Abordagem Mecânica. Artigo no prelo.

- Tebaldi, G., Dave, E. V., Marsac, P., Muraya, P., Hugener, M., Pasetto, M., & Canestrari, F. (2014). Synthesis of standards and procedures for specimen preparation and in-field evaluation of cold-recycled asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 15(2), 272-299.
- Technical Guideline (2020): Bitumen Stabilized Materials – A Guideline for the Design and Construction of Bitumen Emulsion and Foamed Bitumen Stabilized Materials, TG2, Third Edition.
- Transportation Research Board – NCHRP. National Cooperative Highway Research Program. (2009). NCHRP REPORT 626: NDT Technology for Quality Assurance of HMA Pavement Construction. Project 10-65, Washington, D.C.
- Unger Filho, W. (2019). Estudo de mistura asfáltica reciclada a frio produzida com 100% de revestimento asfáltico fresado e agente de reciclagem emulsionado (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo), São Paulo.
- Vieira, G. H. V., & Odebrecht, E. (2020). Avaliação estrutural de pavimentos urbanos a partir de ensaios de campo e retroanálise (Doctoral dissertation, Thesis (MSc). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, SC.
- Von Quintus, H. L. (2009). NDT technology for quality assurance of HMA pavement construction, National Cooperative Highway Research Program – NCHRP REPORT 626, Washington, D. C., EUA.
- WIRTGEN. Manual de Tecnologia de Reciclagem a frio Wirtgen. 1 ed. Alemanha (2012).
- WIRTGEN. O agente de pulverização para reciclagem a frio comprovado mundialmente: Espuma de asfalto. WIRTGEN GmbH 2019. Printed in Germany. Nr. 2547258 PT-02/19 – V1.
- Witczak, M. W.; Kaloush, K. E; Pellinen, T. K.; El-Basyouny, M.; Von *et al.* (2002). Simple performance test for Superpave mix design, National Cooperative Highway Research Program – NCHRP Report 465, Washington, D. C., EUA.